

**DIOGO DE LORENA SILVA GONÇALVES**

**Influência do tratamento térmico de recozimento no comportamento mecânico na liga  
de alumínio AA 3104**

**Diogo de Lorena Silva Gonçalves**

**Influência do tratamento térmico de recozimento no comportamento mecânico na liga  
de alumínio AA 3104**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação de Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof.º Dr.º Valdir Alves Guimarães  
Co-Orientador: Prof.º Dr.º Ângelo Caporalli Filho

G635i      Gonçalves, Diogo de Lorena Silva  
Influência do tratamento térmico de recozimento no comportamento mecânico na liga de alumínio AA 3104 / Diogo de Lorena Silva Gonçalves – Guaratinguetá, 2019.  
58 f : il.  
Bibliografia: f. 56-57

Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019.  
Orientador: Prof. Dr. Valdir Alves Guimarães  
Coorientador: Ângelo Caporalli Filho


1. Ligas de alumínio - Tratamento térmico 2. Cristalização. 3. Micrografia  
I. Título.

CDU 669.715

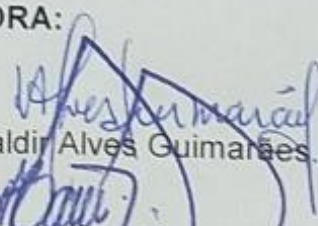
**DIOGO DE LORENA SILVA GONÇALVES**

ESTE TRABALHO DE GRADUACAO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENCAO DO DIPLOMA DE  
"GRADUADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS"

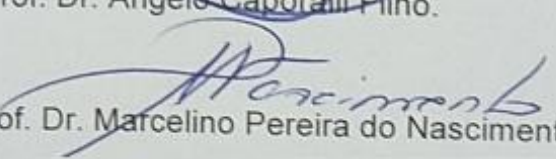
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUACAO EM ENGENHARIA MECANICA

  
Prof. Dr. MIGUEL ANGEL RAMIREZ GIL  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. Valdir Alves Guimarães.

  
Prof. Dr. Angelo Caporali Filho.

  
Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento.

Novembro 2019

a Deus, a minha família e aos amigos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo lar, família e amigos que tive a oportunidade de conhecer. Aos meus pais, *Luiz Antônio e Dânia de Lorena*, pela educação e motivação nesses anos todos de vida. Abriram as portas do mundo para mim, com eles eu pude me preparar para entrar em uma faculdade com ensino de qualidade e na permanência me sustentaram

No período em que estive morando em Guaratinguetá, morei numa república estudantil onde fiz muitos amigos. Todos sempre solícitos. Tivemos muitos momentos bons que me incentivavam a não desistir. Conheci minha namorada, *Erica Yamamoto*, que tem me ajudado a ter foco nesses últimos anos de faculdade. Sempre muito preocupada comigo, me aconselhando e mantendo atento para datas e entregas importantes.

Gostaria de mencionar a minha irmã e meus tios, *Isabella de Lorena, Reginaldo Cunha e Margareth de Lorena*, respectivamente, por sempre estarem presentes nas minhas lutas e conquistas.

Reconhecimento a *Novelis do Brasil*, e todos aquele que me auxiliaram para que esse trabalho acontecesse. Primeiramente, ao *Alexandre Sartori* e a *Marcela Novais*, pela oportunidade. Aos analista e técnicos dos laboratórios do Centro de Tecnologia, *Vitor Ataíde, Rafael Moraes, Walter Junior, Daniel Catarina*, que me deram todo o suporte necessário, agradeço pelos conhecimentos e amizades que fiz.

Agradeço e particular, aos professores *Drº Valdir Alves Guimarães* e *Drº Ângelo Caporalli Filho* pela disponibilidade e conhecimentos passados a diante. De um modo geral, a todo corpo de docentes, técnicos e funcionários do Departamento de Materiais da UNESP.

Gostaria de fazer uma última menção aos meus avós maternos, *Benedito Bernardo* e *Dionice de Lorena*, não os tenho mais em vida, mas foram os maiores exemplos de amor e carinho que tive.

Tudo posso naquele que me fortalece.

Filipenses 4:13

## RESUMO

Neste trabalho tinha-se como objetivo mostrar a evolução das propriedades mecânicas em função do efeito do tratamento térmico de recozimento em diferentes temperaturas. O material utilizado foi disponibilizado na forma de laminas de 27mm de espessura. Assim, realizou-se tratamento térmico de recozimento durante 1 hora e em temperaturas variando na faixa de 140 a 385°C. Posteriormente, foram usinados corpos de prova e realizados ensaios mecânicos de tração e dobramento. A micrografia foi obtida para visualização do formato e tamanho de grão. Observou-se que, as fraturas acontecia no material recozido até 240°C. A partir da temperatura de 310°C, observa-se o início da recristalização. Os limites de resistência apresentaram grande queda a partir da temperatura de 280°C. Enquanto, o alongamento teve grande ganho a partir de 310°C. A recristalização torna-se plena aos 340°C. Não ocorreu crescimento de grão.

**PALAVRAS CHAVE:** Liga AA3104. Tratamento térmico. Recozimento pleno. Recristalização.

## **ABSTRACT**

This work aimed to show the evolution of mechanical properties as a function of the annealing heat treatment effect at different temperatures. The material used was made available as 27mm thick sheets. Thus, annealing heat treatment was performed for 1 hour and at temperatures ranging from 140 to 385°C. Subsequently, specimens were machined and tensile and bending mechanical tests were performed. The micrograph was obtained for visualization of the format and grain size. The fractures were observed in the annealed material up to 240°C. From 310 ° C recrystallization begins. Resistance limits dropped sharply from 280°C. While, the stretching had great gain from 310°C. Recrystallization becomes full at 340 ° C. No grain growth occurred.

**Key-words:** Annealing. AA3104 Alloy. Recrystallization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Índice de reciclagem de embalagens – 1997 a 2017.....	...15
Figura 2 – Consumo do alumínio por produto em 2017.....	...18
Figura 3 – Consumo do alumínio por seguimento em 2017.....	...19
Figura 4 – Propriedades mecânicas em função das concentrações de Mg e Mn a uma determinada liga.....	...23
Figura 5 – Ilustração da distribuição de defeitos dentro de um grão; a) com baixa EDE; b) com alta EDE.....	...25
Figura 6 – Desenhos esquemáticos das etapas de recuperação.....	...26
Figura 7 – Desenho esquemático da migração dos contornos de grão menos deformado (A) na direção do grão mais deformado (B).....	...27
Figura 8 – Desenho esquemático referente ao mecanismo de nucleação da recristalização pela migração de subgrãos.....	...28
Figura 9 – Desenho esquemático referente ao mecanismo de nucleação da recristalização pelo coalescimento de subgrãos.....	...28
Figura 10 – Imagem da preparação de placas e Esquema ilustrativo do processo DC.....	...30
Figura 11 – Imagem do acabamento superficial da placa após fresamento.....	...31
Figura 12 – Esquema ilustrativo do processamento de placas em chapas.....	...32
Figura 13 – Esquema ilustrativo da conformação mecânica aplicada as lâminas.....	...33
Figura 14 – Material disponibilizado pela Novelis para este trabalho.....	...35
Figura 15 – Forno industrial e Termopar.....	...36
Figura 16 – a) Fresadora CNC Sculptor marca Victor Ciola. b) Serra de fita SF-450 marca ETT.....	...37
Figura 17 – a) Máquina de tração marca Kratos modelo KE 10000 MP; b) Micrometro.....	...38
Figura 18 – Equipamento de ensaio de dobramento.....	...39
Figura 19 – Conjunto de imagens de ferramentas, dispositivos e equipamento para realização de polimento.....	...40
Figura 20 – Imagens do dispositivo montado para realização de ataque eletrolítico...	...41
Figura 21 – Microscópio ótico Axio Scope.A1 da marca Carl Zeiss.....	...41

Figura 22 –	Corpos de prova recozidos a temperaturas acima de 300°C após dobramento.....	...43
Figura 23 –	Corpos de prova recozidos nas temperaturas de 200°C (superior) e 220°C (inferior) após dobramento.....	...44
Figura 24 –	Corpos de prova recozidos a temperaturas abaixo acima de 200°C após dobramento.....	...44
Figura 25 –	Corpos de prova recozidos a temperatura de 260°C após dobramento.....	...45

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Resumo do mercado de consumo do Alumínio.....	...20
Quadro 2 –	Micrografias das amostras sem tratamento térmico e recozidas na temperatura de 280°C durante 1h.....	...46
Quadro 3 –	Micrografias das amostras recozidas nas temperaturas de 295 e 310°C durante 1h.....	...47
Quadro 4 –	Micrografias das amostras recozidas nas temperaturas de 325 e 340°C durante 1h.....	...47
Quadro 5 –	Micrografias das amostras recozidas na temperatura de 355°C e 370°C durante 1h.....	...48
Quadro 6 –	Micrografias das amostras recozidas na temperatura de 385°C durante 1h.....	...49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Composição Química da Liga 3104 especificados pela <i>Aluminum Association</i> (Parte 1).....	...21
Tabela 1.2 – Composição Química da Liga 3104 especificados pela <i>Aluminum Association</i> (Parte 2).....	...21
Tabela 2.1 – Resultados dos ensaios de dobramento transversal e longitudinal (Parte 1).....	...42
Tabela 2.2 – Resultados dos ensaios de dobramento transversal e longitudinal (Parte 2).....	...42
Tabela 3 – Resultados das propriedades mecânicas obtidos através de ensaio de tração.....	...50
Tabela 4 – Requisitos para as propriedades mecânicas para a liga AA 3104.....	...51

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	14
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRAFICA</b> .....	16
2.1	EVOLUÇÃO DA INDÚSTRIA DO ALUMÍNIO NO BRASIL.....	16
2.2	LIGAS DE ALUMÍNIO.....	17
2.3	APLICABILIDADE DAS LIGAS DE ALUMINIO.....	18
2.4	LIGA AA 3104.....	21
2.5	ASPECTOS METALURGICOS.....	22
<b>2.5.1</b>	<b>Partículas de segunda fase</b> .....	22
<b>2.5.2</b>	<b>Encruamento</b> .....	24
<b>2.5.3</b>	<b>Recozimento</b> .....	25
<b>2.5.4</b>	<b>Recuperação</b> .....	26
<b>2.5.5</b>	<b>Recristalização</b> .....	27
<b>2.5.6</b>	<b>Crescimento de grão</b> .....	29
2.6	ETAPAS DE PROCESSAMENTO DE CHAPAS.....	29
<b>2.6.1</b>	<b>Preparação de placas</b> .....	29
2.6.1.1	Processo <i>Direct Chill</i> .....	29
<b>2.6.2</b>	<b>Faceamento</b> .....	30
<b>2.6.3</b>	<b>Homogeneização</b> .....	31
<b>2.6.4</b>	<b>Laminação à quente</b> .....	31
<b>2.6.5</b>	<b>Laminação à frio</b> .....	32
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	34
3.1	MATERIAIS.....	35
3.2	TRATAMENTO TÉRMICO.....	36
3.3	USINAGEM.....	37
3.4	ENSAIO DE TRAÇÃO.....	38
3.5	ENSAIO DE DOBRAMENTO.....	39
3.6	METALOGRAFIA E MICROSCOPIA ÓPTICA.....	40
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	43
4.1	RESUTADOS DO ENSAIO DE DOBRAMENTO.....	43

4.2	ANALISE METALOGRAFICA.....	46
4.3	RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO.....	50
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>54</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>55</b>
	<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>57</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

O alumínio é um metal nobre, possui excelentes propriedades físico-químicas que permitem fácil adequação técnica para diferentes aplicações. A transformação do alumínio em seu formato final, pode ocorrer por meio de qualquer processo metalúrgico e técnicas de fabricação conhecidos. Analisando a produção atual de materiais metálicos no mercado brasileiro, é sabido que as ligas de alumínio têm números próximos da produção das ligas de aço, portanto, é a segunda classe de ligas com maior produção nacional. Na região do Vale do Paraíba tem-se um polo comercial muito forte na comercialização dessas ligas, o que propiciou o desenvolvimento deste trabalho. (GUIA TÉCNICO DO ALUMÍNIO, 2004)

Os projetos de desenvolvimento na indústria, geralmente, buscam projetar novas ligas. Portanto, um material nobre como alumínio destaca-se devido a sua versatilidade. Existe uma vasta variedade de elementos de liga que podem ser dissolvidos no alumínio fundido, retidos em solução sólida. O que possibilita ao material projetado uma infinidade de combinações de propriedades mecânicas, e conseqüentemente, aplicações.

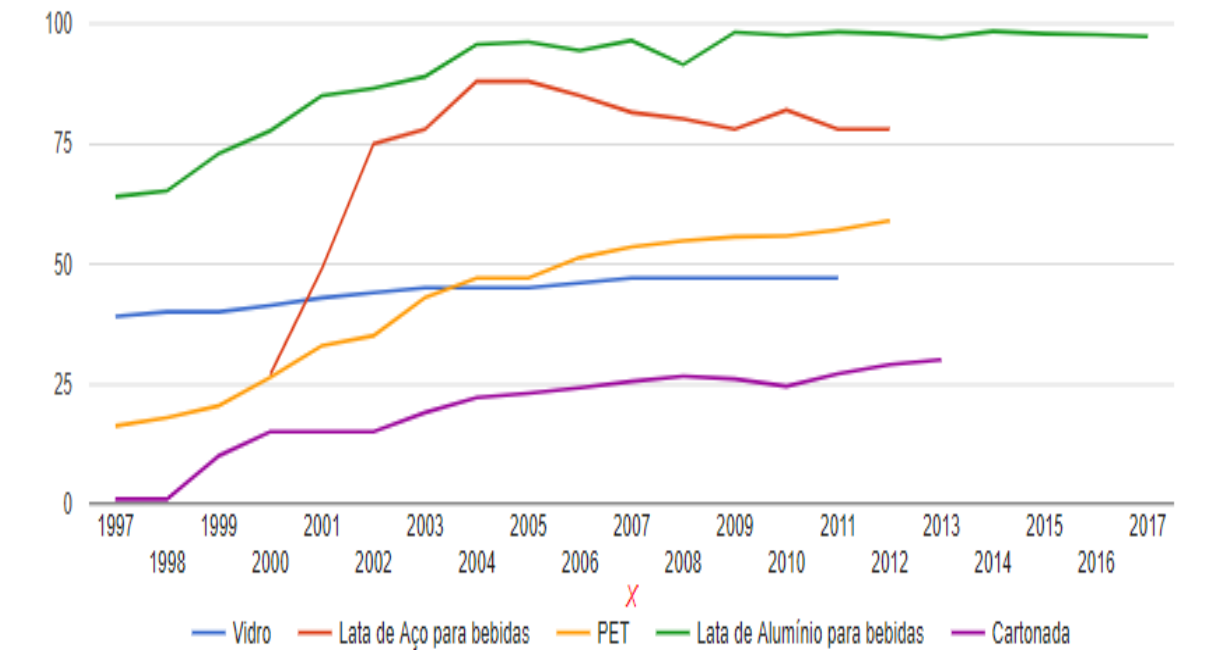
(GUIA TÉCNICO DO ALUMÍNIO, 2004)

Atualmente, a indústria é voltada para alguns pilares, dentre estes, está a sustentabilidade. Desta forma, busca-se substituir o consumo de lingotes primários de alumínio por material proveniente de sucata. Esta nova prática irá reduzir a exploração de jazidas minerais, além de reduzir a emissão de gases poluentes do processo industrial.

(ABRALATAS, 2011)

As sucatas de latinhas, por muitos anos, tem sido o material mais reciclado no Brasil, conforme podemos observar na figura 1. Portanto, a disponibilidade e o custo da matéria-prima sucateada são fatores que despertam o interesse da utilização da liga AA3104 na indústria. Esta caracterização trará diversos benefícios a empresa em custos; qualidade, resolvendo o problema do cliente e reduzindo devoluções; e em excelência operacional, prevendo uma quantidade menor de horas de equipamentos parados.

Figura 1 – Índice de reciclagem de embalagens – 1997 a 2017.



Fonte: ABRALATAS (2018).

## 1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

Neste trabalho busca-se caracterizar a liga AA 3104. Basicamente, o principal objetivo é fazer com que a liga não frature em solicitações de dobramento do material. O produto final precisa ser mais dúctil. Assim, realiza-se um mapeamento das propriedades e mecanismos mecânicos em função da temperatura de tratamento térmico de recozimento. Desta forma, este material que é fabricado todos os dias para a indústria de embalagens, poderá ser processado para demais aplicações, como a chapa para pisos antiderrapantes, utilizada na indústria civil e de transportes.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 EVOLUÇÃO DA INDÚSTRIA DO ALUMÍNIO NO BRASIL

A primeira companhia a iniciar os trabalhos com o alumínio no Brasil foi a Companhia Paulista de Artefatos de Alumínio (CPAA) em 1917, que tinha como produtos chapas fundidas. Posteriormente, outras empresas entraram no mercado nacional, porém muito dependentes da importação de matéria-prima. (ABAL, 2019a)

Os estudos para a implementação da produção do alumínio primário se iniciaram no final da década de 1920. Empresários incentivaram as primeiras produções com os recursos cabíveis às empresas na época, Eletro Química Brasileira S/A (Elquisa) e a Companhia Brasileira de Alumínio (CBA). Entretanto, não atendiam a demanda nacional, além da concorrência do produto importado. Apenas foi possível engrenar a indústria nacional quando se teve incentivo do governo, que se iniciou no mandato de Getúlio Vargas em 1938. Porém seu mercado apenas se consolidou em escala industrial em 1944, durante a 2ª Guerra Mundial. (ABAL, 2019a)

A evolução do produto ocorreu devido as grandes reservas naturais de bauxita. As primeiras jazidas encontradas se localizavam nas cidades de Ouro Preto, Poços de Caldas e Alumínio. Tal interesse econômico fez com que as empresas passassem por incorporações de empresas estrangeiras como a Alcan e Alcoa, adquirindo a Elquisa e a Companhia Geral de Minas, respectivamente. Na década de 1970, a Alcoa passou a produzir o alumínio para o mercado interno, e posteriormente, em 1982, por iniciativa econômica da Companhia Vale do Rio Doce e Billiton Metais S.A, foi fundada a Valesul Alumínio S.A., empresa que foi responsável pelas primeiras produções voltadas para o mercado nacional. (ABAL, 2019a)

Muitas empresas foram fundadas diante de uma perspectiva de abundância de recursos minerais no Brasil. Porém, tiveram suas plantas fechadas devido a diversos fatores. Dentre os principais estão: a instabilidade do mercado brasileiro, vulnerabilidade econômica e queda mundial no valor das commodities, como ocorreu em 2009. Diante desse cenário e de uma tendência atual de sustentabilidade, a indústria nacional passou a utilizar-se de sucata como matéria-prima, reduzindo o consumo de lingotes primários.

Atualmente, o Brasil é campeão mundial em reciclagem de latas de alumínio, resultados que vem se repetindo desde 2000. Com o passar dos anos, o sistema passou a ser mais eficiente, capacitado, os catadores de lixo foram profissionalizados. Hoje, tem-se uma maior

conscientização da população, a coleta seletiva é muito mais efetiva, o que melhora a produtividade dos profissionais e da indústria de latas. (ABRALATAS, 2011)

## 2.2 LIGAS DE ALUMÍNIO

As ligas de alumínio possuem uma combinação de propriedades importantes requeridas em projetos mecânicos, que são: baixo peso específico e resistência à corrosão. A adição dos elementos de liga proporciona uma vasta versatilidade do material. As ligas podem apresentar características tais quais: condutividade elétrica e térmica; ductilidade; usinabilidade; coeficiente de dilatação térmica maior que o do aço; atoxidade; refletividade; propriedade antimagnética; características de barreira. (GUIA TÉCNICO DO ALUMÍNIO, 2004)

Entretanto, a adição de elementos de liga pode ser prejudicial a fabricação. Por isso, são determinados teores máximos de cada elemento por norma. Os elementos de engenharia podem apresentar uma característica principal, influenciando diretamente nas propriedades mecânicas. Enquanto outros, tem função acessória, controlam os tamanhos de grãos, por exemplo. (GUIA TÉCNICO DO ALUMÍNIO, 2004)

As ligas de alumínio são classificadas em dois principais grupos: ligas comerciais fundidas ou trabalhadas. Tais classificações se subdividem em ligas endurecíveis por solubilização e precipitação, ou não. As ligas trabalhadas apresentam maiores limites de resistência dependendo do processo térmicos e/ou mecânicos utilizado. Barreiras devem ser formadas para restringir as movimentações das discordâncias. (ZANGRANDI, 2006)

Os processos de endurecimento conhecidos são: por solução sólida, elementos de liga são adicionados dentro dos limites de solubilidade, o grau do endurecimento depende sempre da quantidade e de qual soluto é adicionado; por dispersão de segunda fase, excede-se a solubilidade do elemento adicionado, formando uma segunda fase incoerente, frágil; por precipitação, com a solução sólida supersaturada, forma-se partículas coerentes na matriz; por refino de grão, a diminuição do tamanho de grão gera maior nível concentrações de discordâncias; encruamento, a deformação plástica a frio aumenta a concentração das discordâncias, restringindo sua movimentação. (ZANGRANDI, 2006)

### 2.3 APLICABILIDADE DAS LIGAS DE ALUMÍNIO

O alumínio é um material muito versátil. Os produtos desse material podem ser obtidos por todos os processos metalúrgicos usuais da indústria, como podemos ver na figura 2 e 3. O material é consumido em diferentes formatos e por diversos segmentos. O alumínio pode ser fundido por qualquer processo conhecido; laminado em espessuras inferiores a 1 milímetro; extrudado, formando produtos com grandes comprimentos; forjado; estampado; cunhado, dentre outros processos em que se obtém produtos de alta qualidade. O acabamento superficial do alumínio pode ser feito de diversas maneiras e em velocidades altíssimas, atingindo as velocidades máximas dos equipamentos de usinagem conhecidos. Os métodos de união também são aplicáveis, simplificando as fabricações de uma infinidade de produtos. Também não há a necessidade de um revestimento de proteção, apenas acabamentos simples de polimento e escovamento garantem durabilidade e alta qualidade do produto final.

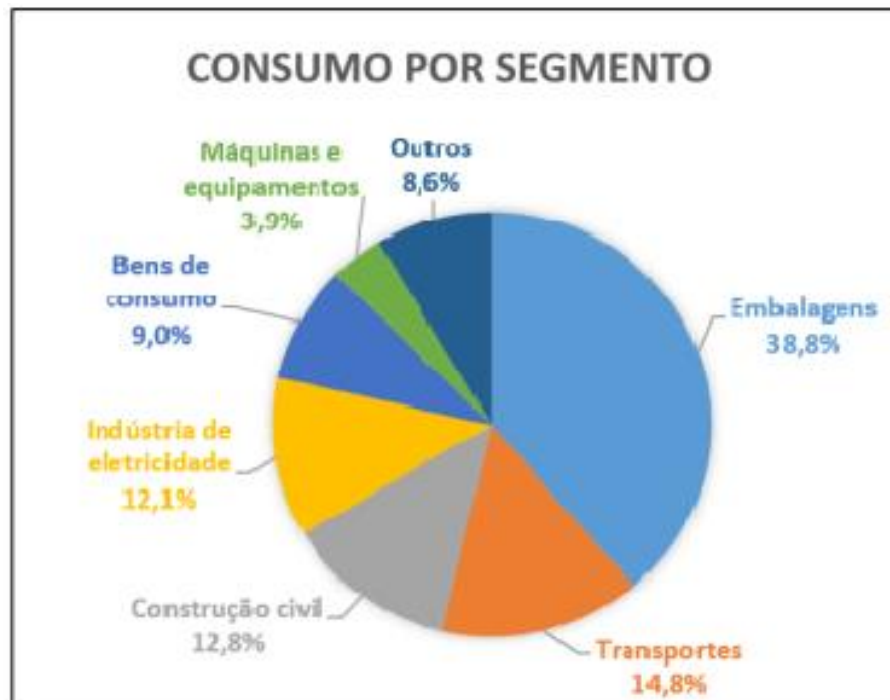
(GUIA TÉCNICO DO ALUMÍNIO, 2004)

Figura 2 – Consumo do alumínio por produto em 2017.



Fonte: Adaptado Pinto (2019).

Figura 3 – Consumo do alumínio por seguimento em 2017.



Fonte: Adaptado Pinto (2019).

O segmento com maior porcentagem de consumo é o ramo de embalagens, mais especificamente, latas de bebidas. Justificam-se esses números, o fato da reciclagem desse produto ser elevadíssima, o que reduz o consumo de energia no processamento, e consequentemente, os custos. No quadro 1, segue diversas informações das aplicações mais conhecidas atualmente, informando as características que qualificaram o alumínio para tais.

Quadro 1 - Resumo do mercado de consumo do Alumínio.

Indústria	Aplicação	Características	Exemplos
Construção Civil	Esquadrias e Revestimentos	Variabilidade de acabamentos, formas e usos. Alta resistência e vida útil.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fachadas envidraçadas;</li> <li>▪ Revestimento de interiores e exteriores;</li> <li>▪ Decorações.</li> </ul>
	Telhas	Baixo peso específico. Alta resistência a impactos e corrosão atmosférica. Baixo Custo. Refletividade. Condutividade térmica.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Telhas em alumínio pintado</li> <li>▪ Cobertura</li> </ul>
	Estruturas	Economia em peso, o que reduz custos de material e de mão de obra. Utilizado em ambientes corrosivos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estruturas de: shoppings, terminais, aeroportos, ginásios, espacial.</li> </ul>
Transportes	Aeronáutica	Elevada correlação de resistência e baixo peso específico.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aviões;</li> <li>▪ Foguetes;</li> <li>▪ Espaçonaves.</li> </ul>
	Automotiva	Redução em peso, que gera menos emissão de poluição. Alta Vida Útil.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Carrocerias;</li> <li>▪ Pistões;</li> <li>▪ Blocos de motor;</li> <li>▪ Chassis.</li> </ul>
	Embarcações	Elevada resistência a corrosão em água salgada.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lanchas;</li> <li>▪ Navios;</li> <li>▪ Submarinos,</li> </ul>
	Vagões	O Baixo peso específico, tem ganhos em velocidade, manutenção e consumo de combustível.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Trem</li> <li>▪ Metro</li> </ul>
Eletrônica	Cabos condutores	Alta condutividade elétrica	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Capacitores e Chassis eletrônicos;</li> <li>▪ Transformadores, solenoides, reles.</li> </ul>
Embalagens	Alimentos	Compatibilidade do alumínio com alimentos e produtos químicos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Latas de bebidas</li> <li>▪ Pratos e embalagens descartáveis</li> </ul>
	Farmacêutico		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tubos de pasta de dente</li> <li>▪ Para remédios.</li> </ul>
Bens de Consumo	Utilidade domésticas	Leveza, fácil manuseio, elevada condutividade térmica, ótimo acabamento superficial	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fogões;</li> <li>▪ Micro-ondas</li> <li>▪ Máquina lava-roupa</li> <li>▪ Refrigerador</li> </ul>
Máquinas e Equipamentos	Construção de máquinas	Leveza, condutividade térmica, resistência a corrosão	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Trocador de calor</li> <li>▪ Máquinas agrícolas</li> <li>▪ Instrumentos científicos</li> </ul>
	Química		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Vasos de reações</li> <li>▪ Tubulações</li> <li>▪ Tanque de estocagem</li> </ul>

Fonte: Adaptado do Guia Técnico do Alumínio (2004)

## 2.4 LIGA AA 3104

A liga AA 3104 é uma liga que se obtém melhores propriedades mecânica através de encruamento e formação de solução sólida. Não são ligas tratáveis termicamente. Nas tabelas 2.1 e 2.2, apresenta-se a composição química da liga determinada por norma pela *Aluminum Association*. Os efeitos do recozimento estudadas nesse trabalho são para diminuir a resistência mecânica obtida no encruamento após laminação a frio. (CALÇADA, 2018)

Tabela 1.1 – Composição Química da Liga 3104 especificados pela *Aluminum Association* (Parte 1).

Liga (% em peso)	Si (Max)	Fe (Max)	Cu (Min-Max)	Mn (Min-Max)	Mg (Min-Max)
3104	0,6	0,8	(0,05-0,25)	(0,8-0,14)	(0,8-0,13)

Fonte: ALUMINUM (2009)

Tabela 1.2 – Composição Química da Liga 3104 especificados pela *Aluminum Association* (Parte 2).

Liga (% em peso)	Zn (Max)	Ti (Max)	Ga (Max)	V (Max)	Outros (Max)
3104	0,25	0,1	0,05	0,05	0,15

Fonte: ALUMINUM (2009)

As especificações determinadas pela *Aluminum Association*, possibilita uma vasta variedade de elementos de ligas que podem ser incorporados em solução sólida. Assim, a presença de partículas intermetálicas é característica desse material. A composição química e os processos mecânicos realizados no processamento da liga determinam a microestrutura. Portanto, influenciam no tamanho, distribuição e densidades dessas partículas de segunda fase. Também têm influência direta no tamanho de grão, anisotropia, formabilidade e acabamento superficial do material. (CALÇADA, 2018)

Os principais elementos para formação das partículas intermetálicas são: magnésio, ferro e silício. Essas partículas são instáveis. A morfologia dessas partículas é ramificada, possui uma grande densidade de defeitos e encontram-se nos contornos de grão da matriz dendrítica do alumínio fundido. (CALÇADA, 2018)

## 2.5 ASPECTO METALURGICO

O entendimento do aspecto metalúrgico da liga é fundamental para alcançar as melhores propriedades mecânicas dos materiais em um projeto ou produto. Tratando especificamente do alumínio, tem-se uma busca para obter ligas cada vez mais resistentes e versáteis. Esses estudos varrem diferentes áreas do conhecimento, vão desde variações na composição química à diversos aspectos termomecânicos do processamento das ligas. (ZANGRANDI, 2006)

Como sabemos, as ligas de alumínio são classificadas em ligas tratadas termicamente ou não. Para as ligas não tratáveis termicamente, estudam-se o trabalho mecânico a frio e os constituintes de segunda fase da liga. Enquanto para as ligas tratáveis termicamente, deve-se saturar a liga com elementos de liga, para que ocorra a precipitação de partículas coerentes e submicroscópicas em solução. (ZANGRANDI, 2006)

### 2.5.1 Partículas de segunda fase

A rota de processamento de uma liga possui processos térmicos e mecânicos para se obter o produto final. As liga de alumínio do grupo 3XXX, nos processos térmicos, as partículas de segunda fase se desestabilizam e crescem. Enquanto, nos processos mecânicos, as partículas mudam seu formato. A energia de deformação aplicada faz com que as discordâncias se movimentem, gerando uma redistribuição das partículas pelo material. (CALÇADA, 2018)

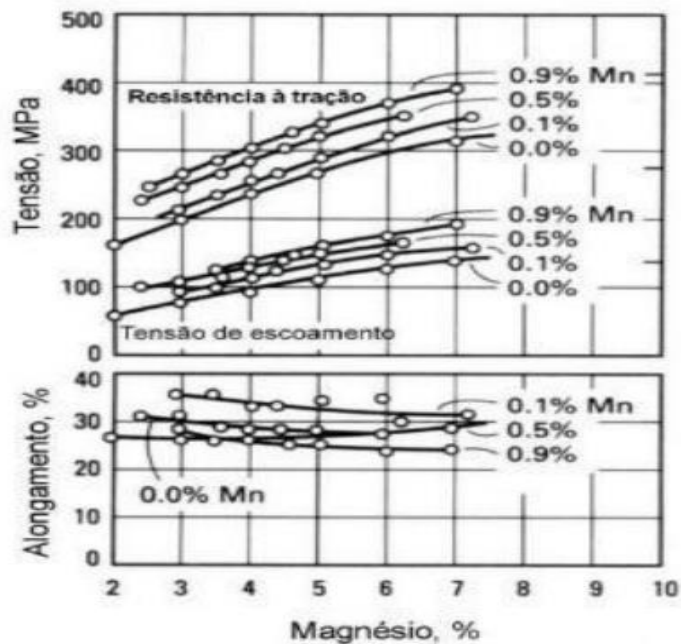
Falando especificamente da liga AA3104, devido à baixa solubilidade do manganês e do ferro, tais elementos sempre estarão supersaturados em solução sólida. Assim, as partículas de segunda fase se formam a partir do processo de fundição, as quais são as fases ortorrômbica,  $\text{Al}_6(\text{Fe},\text{Mn})$ , e cúbica,  $\alpha\text{-Al}_{12}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}$ . A proporção das mesmas depende da composição química e taxa de resfriamento, em condições comerciais, a fase ortorrômbica é mais predominante, cerca de 85%, trata-se de uma solução sólida metaestável supersaturada. (CALÇADA, 2018)

Acompanhando a evolução da temperatura de fundição podemos entender a influência da composição química nas propriedades mecânicas da liga. A partir dos 300°C, inicia-se as precipitações na matriz de alumínio com a formação da fase  $\beta\text{-Mg}_2\text{Si}$ ; próximo as 400°C, a fase  $\alpha\text{-Al}_{12}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}$  nucleia-se na  $\beta\text{-Mg}_2\text{Si}$ , dissolvendo a mesma com o aumento da temperatura, até atingir a temperatura de 480°C, a partir desse ponto o manganês passa a se solubilizar na matriz de alumínio. A temperatura de homogeneização é determinante no processo, pois a

mesma irá determinar a fração volumétrica e o tamanho médio dessas fases metaestáveis, também conhecidos como dispersóides. (CALÇADA, 2018)

Entende-se que as partículas da fase  $\alpha$ - $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}$  são mais duras que as partículas de  $\text{Al}_6(\text{Fe}, \text{Mn})$ , portanto, maiores concentrações de silício torna o material mais abrasivo. Ajudam na limpeza das ferramentas de estampagem. Maiores concentrações de magnésio aumentam o endurecimento por solução sólida, como podemos observar na figura 4. Enquanto maiores concentrações de manganês aumentam a fração de dispersóides, sendo possível controlar o tamanho de grão e ter ganhos em aumento de resistência mecânica. (CALÇADA, 2018)

Figura 4 – Propriedades mecânicas em função das concentrações de Mg e Mn a uma determinada liga.



Fonte: Hatch (1984)

O aumento no teor de magnésio representa uma contribuição ao endurecimento por solução sólida. Já o aumento do teor de manganês proporciona uma maior fração de precipitados de segunda fase e dispersóides, que contribuem para o aumento da resistência mecânica controlando o tamanho de grão final do material. Com pouco ferro disponível na matriz, a transformação  $\alpha$  retira tanto o Si como o Mn da matriz. (CALÇADA, 2018)

### 2.5.2 Encruamento

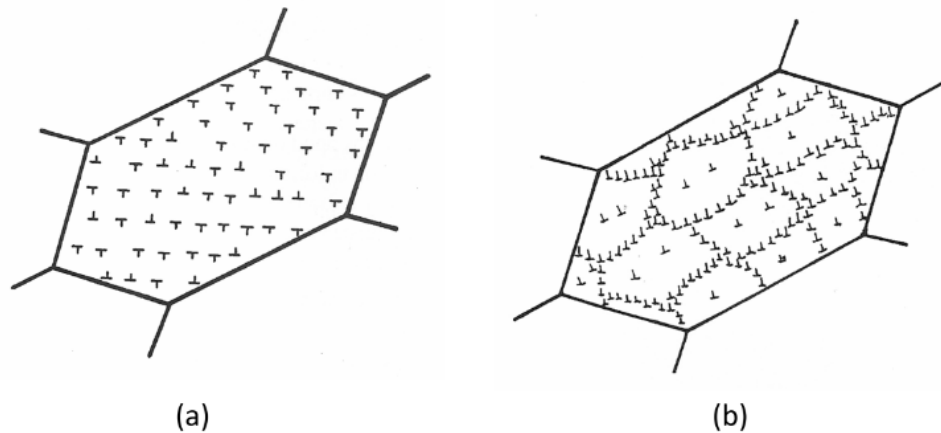
Tratando-se de metais monofásicos e policristalinos, as técnicas de aumento de resistência mecânica se baseiam em restringir o movimento das discordâncias, tais são: encruamento, formação de ligas por solução sólida e redução do tamanho de grão. Basicamente, o encruamento é um mecanismo oriundo do trabalho mecânico a frio, mensurado pelo grau de deformação plástica aplicado. Esse fenômeno ocorre devido ao aumento da densidade de discordâncias e aparecimento de novas que, resultam em maior restrição dos planos de escorregamento favoráveis da microestrutura. Isso ocorre devido as interações repulsivas entre a discordância e seu campo de deformação, assim, maior tensão é necessária para ocorrer a deformação plástica. (CALLISTER, 2008)

A energia aplicada à conformação do material, na sua maioria, é dissipada na forma de calor, sendo armazenado apenas cerca de 2 a 10% na forma de defeitos cristalinos. A distribuição desses defeitos cristalinos é mensurada pela energia do defeito de empilhamento (EDE). Maior a EDE, caracteriza-se uma má distribuição das discordâncias. Assim, resultado é maior mobilidade das discordâncias, facilitado por uma menor distância entre elas. Formam-se caminhos preferenciais de movimentação, favorecendo a aniquilação das discordâncias de sinais opostos. (PADILHA, 2009)

Alguns fatores afetam a EDE, os quais são: átomos de soluto introduzidos a liga, dependendo do elemento introduzido, pode ocorrer aumento ou diminuição; o tamanho do grão inicial, quanto menor, maior EDE; temperatura de deformação, quanto maior, maior a EDE; velocidade de deformação, seu aumento é semelhante a uma leve diminuição da temperatura de deformação. (PADILHA, 2009)

No parágrafo anterior foi discutido sobre a energia de deformação armazenada junto aos defeitos, o que impacta na densidade e distribuição dos mesmos dentro de um grão. Entretanto a discussão das heterogeneidades dos defeitos de um modo geral, não exclusivamente no interior dos grãos, é muito importante. Como podemos observar na figura 5, a distribuição heterogênea apresenta em b), tem-se certos acúmulos de discordâncias, caminhos onde preferencialmente se iniciará a recristalização.

Figura 5 – Ilustração da distribuição de defeitos dentro de um grão;  
a) com baixa EDE; b) com alta EDE.



Fonte: Padilha (2009).

Dentre as heterogeneidades tem-se: as bandas de transição, que são deformações heterogêneas dentro de um grão que sofrem diferentes rotações por conta dos diferentes sistemas de escorregamento; as bandas de cisalhamento, ocorrem entre os grãos, devido a grandes reduções ou altas velocidades de deformação, onde a deformação encontra resistência por não estar em um plano de escorregamento, gerando o cisalhamento de um grão, atravessando os demais, formando um ângulo de 30 a 60° em relação ao plano de deformação; e maclas de deformação, que ocorre no interior dos grãos e em estruturas com poucos planos preferencias de escorregamento, gerando movimentos atômicos na estrutura, ocorrendo dissipação da EDE. (PADILHA, 2009)

### 2.5.3 Recozimento

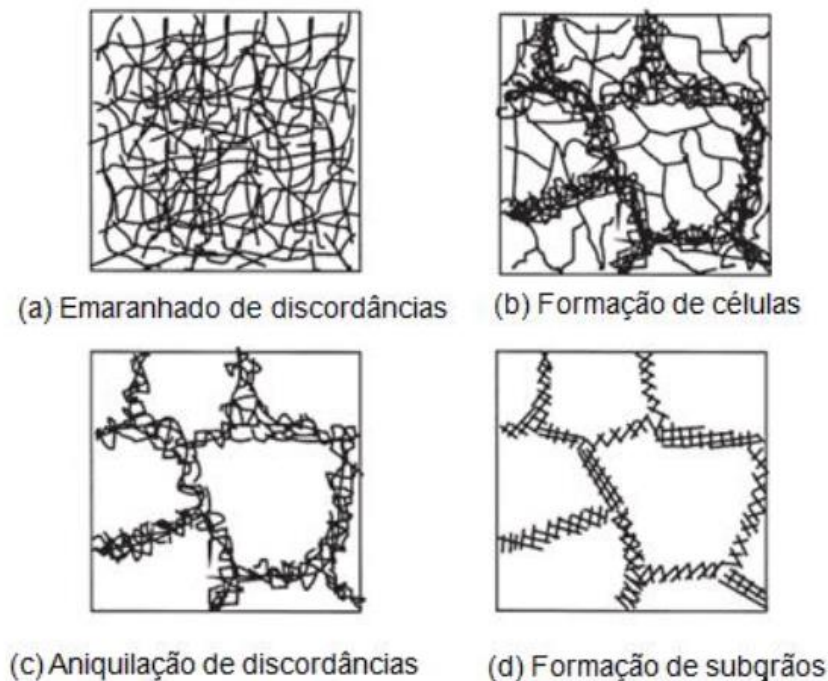
As ligas deformadas a frio têm um ganho na energia interna do material, o que resulta em uma estrutura estável mecanicamente. Porém, ao submeter o material encruado a um aumento significativo de temperatura, as propriedades mecânicas retornam as condições iniciais da liga sem deformação aplicada. Esse processo de estabilização térmica chama-se recozimento, e pode ser subdividido em três etapas: recuperação, recristalização e crescimento de grão. (PINTO, 2019)

### 2.5.4 Recuperação

A energia de deformação aplicada ao material tem influência direta nas discordâncias e átomos ao seu redor. Conseqüentemente, alteram-se as propriedades mecânicas de tração, compressão e cisalhamento. É na recuperação que boa parte dessa energia de deformação é liberada, proporcionando movimentação das discordâncias sem interferência de forças externas. Assim, restaura-se parcialmente a microestrutura e as propriedades anteriores ao encruamento, ocorre uma mudança na configuração e distribuição das discordâncias, além da eliminação de boa parte delas. (CALLISTER, 2008)

A aniquilação das discordâncias e rearranjo das configurações de baixa energia acontecem devido a dois mecanismos: escalagem de componentes em cunha, encontro de discordâncias de sinais opostos; e deslizamento com desvio das discordâncias tipo hélice, apresentam vetores de burgers opostos. Esses mecanismos ocorrem nas faixas de 0,2 a 0,3 da temperatura de fusão da liga. Como podemos ver na figura 6, as discordâncias de mesmos sinais tendem a se aproximar caso possuam energia suficiente, visto em b); formam uma configuração de menor energia, em c); e, por consequência, tem-se a formação de subgrãos, em d), que ocorre em temperaturas próximas a 0,4 da TF. (PINTO, 2019)

Figura 6 – Desenhos esquemáticos das etapas de recuperação.



Fonte: Souza (2018).

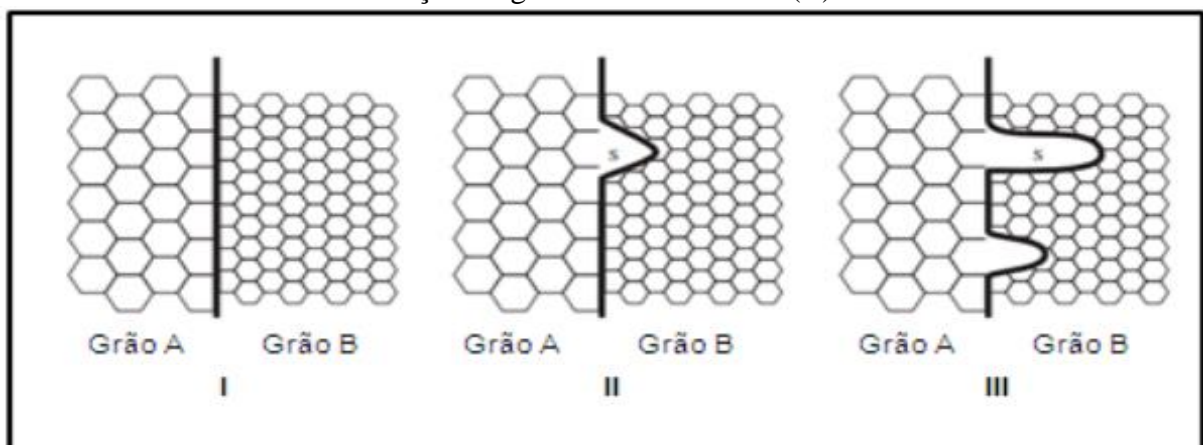
Essa taxa de movimentação de discordâncias, ou taxa de recuperação, é regida pela intensidade da EDE, a qual tem sua intensidade diminuída pela quantidade de átomos em solução sólida, pois dificultam o fluxo, a concentração e mobilidade das discordâncias. Com o aumento da temperatura de forno, ocorre uma redução constante da energia interna armazenada, junto com uma redução da força motriz, proporcionando o fenômeno da recristalização. (PINTO, 2019)

### 2.5.5 Recristalização

Entende-se por recristalização o reestabelecimento da microestrutura e das propriedades mecânicas anteriores à deformação plástica. Retorna-se a um conjunto de grãos equiaxiais e com baixa densidade de discordâncias. Existem duas principais variáveis que influenciam na plenitude do mecanismo, o tempo e a temperatura, sendo que com o aumento das mesmas, aumenta-se o grau de recristalização. (CALLISTER, 2008)

Na recristalização ocorre a eliminação de grande parte da energia armazenada na deformação a frio, através de heterogeneidades como bandas de transição, cisalhamento, dobramento e deformação. As partículas de segunda fase também armazenam defeitos cristalinos que retêm a energia de deformação e são eliminados através da migração dos contornos de alto ângulo. Sucintamente, a recristalização tem seu início com a formação de núcleos em regiões com baixa densidade de defeitos eliminados por contornos de alto ângulo. Este fenômeno ocorre pela migração de contornos de alto ângulo formados na deformação, a evolução da migração dos contornos de grão estão ilustrada na figura 7. (PINTO, 2019)

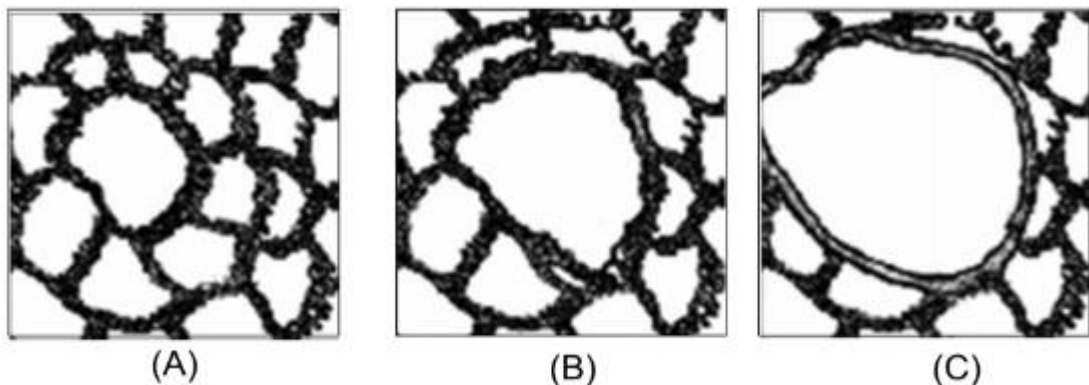
Figura 7 – Desenho esquemático da migração dos contornos de grão menos deformado (A) na direção do grão mais deformado (B).



Fonte: Souza (2018).

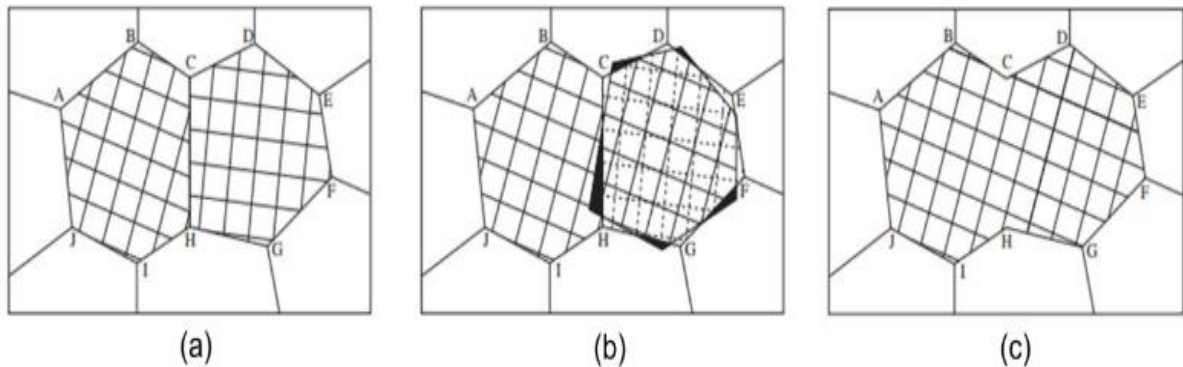
A nucleação da recristalização pode ocorrer também pela migração dos subgrãos com uma alta ativação térmica. Os subgrãos maiores crescem às custas dos vizinhos, como pode-se observar a evolução na figura 8. Absorvem as discordâncias, aumentam a diferença de orientações e formam os contornos de alto ângulo. Pode ocorrer também, o coalescimento de subgrãos vizinhos, visto na figura 9, através de uma rotação dos subgrãos em relação aos demais. (DE SOUZA, 2018)

Figura 8 – Desenho esquemático referente ao mecanismo de nucleação da recristalização pela migração de subgrãos



Fonte: De Souza (2018).

Figura 9 – Desenho esquemático referente ao mecanismo de nucleação da recristalização pelo coalescimento de subgrãos.



Fonte: De Souza (2018).

O grau de encruamento tem influência direta em todos os parâmetros da recristalização: quanto maior for o grau, menor a temperatura de recozimento e menor o tamanho médio do grão final. Após a nucleação de recristalização atinge-se o estado pleno, que ainda não é o estado mais estável. Pois, ainda há energia interna, potencial termodinâmico, que faz com que ocorra o crescimento de grão da estrutura. (PINTO, 2019)

### 2.5.6 Crescimento de grão

Uma estrutura caracterizada de grãos finos possui uma grande área superficial de contornos de grão. Buscando a estabilidade térmica, os grãos crescem e em contra partida, o número de grãos diminui. Esse processo se distingue da recristalização quando se trata de potencial termodinâmico. No crescimento de grão, o potencial está nos contornos, e não na energia armazenada nos defeitos cristalinos. Tratando-se de velocidade da migração dos contornos, no crescimento de grão, é maior, e os contornos movem-se no sentido da curvatura, enquanto na recristalização, movem-se no sentido contrário. Nota, o crescimento de grão varia conforme temperatura, presença de átomos de soluto e tamanho da amostra.

(DE SOUZA, 2018)

## 2.6 ETAPAS DE PROCESSAMENTO DE CHAPAS

O processo de laminação consiste na redução da altura de uma placa de seção transversal retangular. Através de forças compressão impostas pela passagem da placa entre dois cilindros. Tem-se como produto final: chapas, placas, folhas e discos. Portanto, é possível obter-se produtos com grande variedade dimensional na espessura do material, o que impacta em uma vasta variedade de aplicações nos setores de transportes, construção civil, embalagens e bens de consumo. O processamento pode ser dividido em quatro principais etapas: preparação de placas; laminação a quente, laminação a frio e acabamento. (ABAL, 2019b)

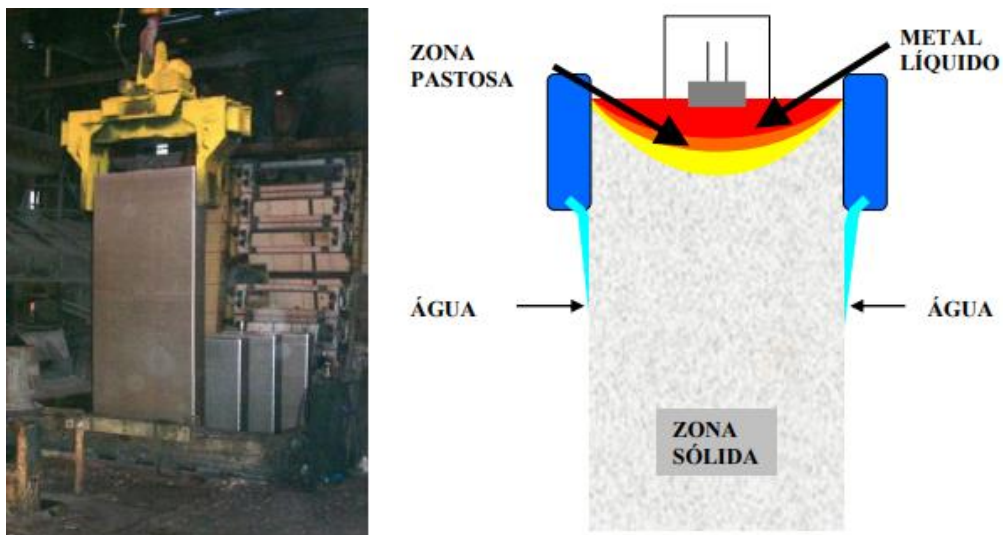
### 2.6.1 Preparação de placas

A preparação de placas tem como sequência de etapas: fundição, faceamento e homogeneização. A fundição em alumínio pode ser realizada de diferentes modos, tais são: por gravidade, utilizando um molde metálico ou areia onde o material é vazado; por pressão, o material é injetado para dentro de uma cavidade, molde; e processos especiais, como tixofundição, em que material é depositado semissólido no molde, em pasta. Para a preparação de placas o alumínio líquido é vazado em molde em um processo conhecido como *Direct Chil*. (ABAL, 2019b)

### 2.6.1.1 Processo *Direct Chill*

O processo *Direct Chill* consiste basicamente no vazamento do metal líquido em um molde refrigerado com água, trata-se de um processo descontínuo. Como visto na figura 10, o metal ao entrar em contato com as paredes do molde refrigerado por água, começa a solidificar; a base do molde movimenta-se para baixo, mesmo sentido e direção da força gravitacional; assim, o metal deixa de ter contato com as paredes laterais do molde e passa a ser solidificado por uma cortina de água que acelera a extração de calor do material; tendo como produto final uma placa. O processo DC possui uma taxa de resfriamento considerada baixa, em torno de  $1^{\circ}\text{C/s}$ , resultando em solidificação que favorece a precipitação dos elementos de liga, gerando partículas grosseiras na microestrutura. (MINATEL, 2009)

Figura 10 - Imagem da preparação de placas e Esquema ilustrativo do processo DC

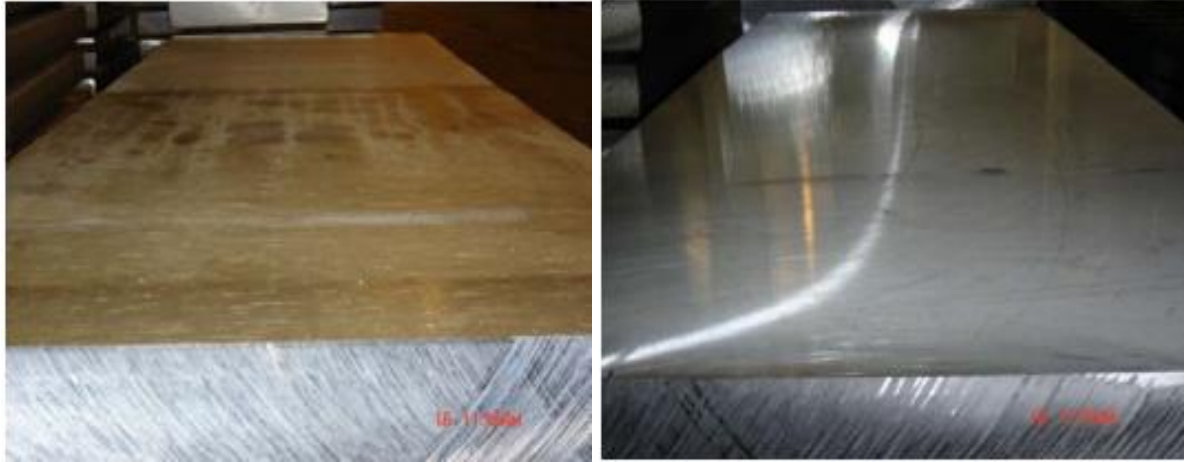


Fonte: Minatel (2009).

### 2.6.2 Faceamento

O faceamento da placa é um processo de usinagem com o objetivo de melhorar o acabamento superficial das placas. São utilizadas fresas para que sejam removidas camadas de óxidos, grãos colunares, impurezas oriundas do forno e molde, e de segregações que se estabelecem nas superfícies. O produto acabado, pós faceamento, pode ser observado em ambas as imagens da figura 11. (MINATEL, 2009)

Figura 11 – Imagem do acabamento superficial da placa após fresamento.



Fonte: Minatel (2009).

### 2.6.3 Homogeneização

O tratamento térmico de homogeneização possui duas principais funções, tornar a microestrutura livre do excesso de precipitados e mais homogênea. Pois ao longo do processamento, a matéria-prima que é comercialmente adquirida contém excesso de precipitados interdendríticos, e ao passar por cinéticas de aquecimento e resfriamento, resulta em uma microestrutura heterogênea e com muitos precipitados grosseiros. Tais precipitados precisam ser solubilizados, e é necessário fornecer energia ao material que irá para a laminação, onde passará por reduções bruscas. (MINATEL, 2009)

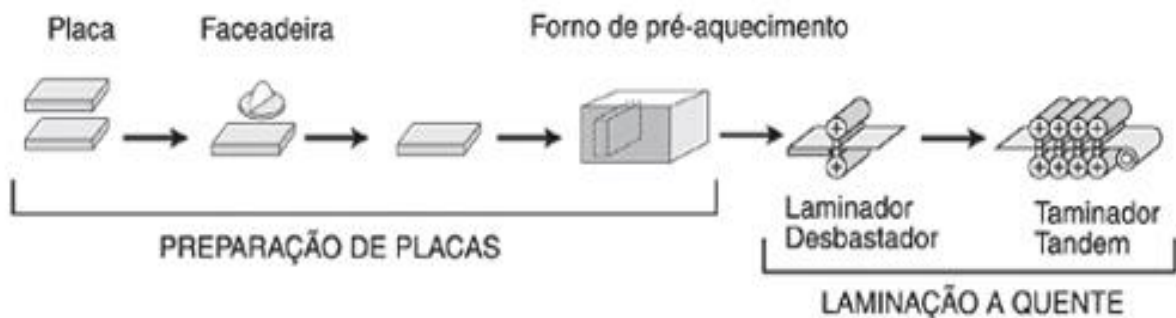
Na homogeneização as partículas de segunda fase desestabilizam, sofrem alterações de forma e crescem, devido à exposição térmica. Porém, quando aplicadas altas taxas de deformação, uma fração das partículas são decompostas, as demais, mudam seu formato novamente e são redistribuídas pela estrutura do material. Basicamente, a intenção da homogeneização é evitar microsegregações dessas fases metaestáveis, em paralelo a esse processo ocorre a precipitação de supersaturados transformação da fase ortorrômbica em cúbica e crescimento de partículas intermetálicas estáveis. (CALÇADA, 2018)

### 2.6.4 Laminação à quente

A laminação a quente tem como objetivo principal fazer a redução dimensional do material em dimensões finais próximas a 10% da espessura de entrada. (ABAL, 2019b)

Caracteriza-se pela entrada da placa aquecida, em temperaturas acima da temperatura de recristalização, para torna-la semi-plástica. Como pode ser visto na figura 12, a placa é passada entre um ou mais conjuntos de laminadores reversíveis, onde cada deslocamento pelo laminador acontece uma redução de aproximadamente 50% da espessura. Na laminação a quente, as placas sofrem reduções até o material se aproximar de uma espessura de 6mm. O produto deixa de ser enquadrado como placa, para ser chamado de lâmina. (ABAL, 2019b)

Figura 12 - Esquema ilustrativo do processamento de placas em chapas.



Fonte: ABAL (2019).

A intenção de pré-aquecer as placas para passar nos laminadores é eliminar as discordâncias poligonizadas de baixa energia que são oriundas das altas taxas de redução, de deformação plástica aplicada, através do mecanismo de recuperação dinâmica. Entretanto, esses defeitos não são totalmente eliminados, porém podem ser mensurados e controlados através de parâmetros de processo que podem ser alterados, os quais são: composição química; tempo e temperatura, a fim de determinar o tamanho e a dimensão dos precipitados; e trajetória e taxas de deformação. (CATARINA, 2013)

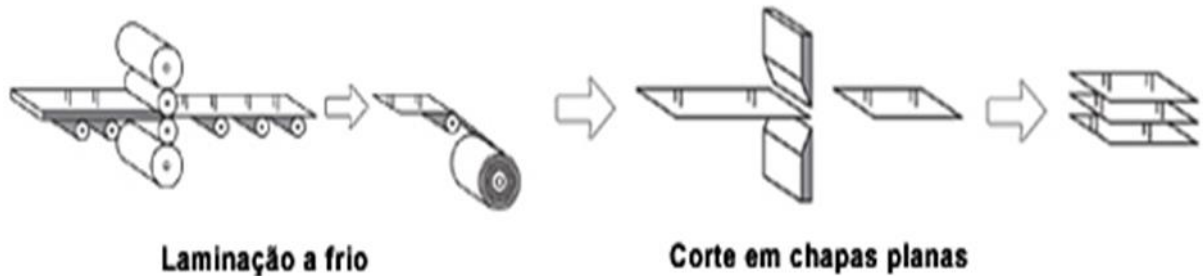
### 2.6.5 Laminação à frio

Na laminação a frio, tem-se por objetivo conferir ao material encruamento, para isso o processo tem que ser realizado a temperaturas baixas, inferiores a temperatura de recristalização e recuperação do material. O produto final obtido possui maiores limites de resistência à tração e escoamento, melhor precisão dimensional e acabamento superficial. (ABAL, 2019b)

Nessa etapa, ilustrada na figura 13, as laminas passam por um conjunto de laminadores quádruplos, reversíveis ou não. Os tamanhos de entrada e saída da lâmina podem variar entre

30 a 70% de redução. A aplicação final rege não só qual composição de liga é utilizada, mas também, qual a têmpera será necessária no processo. (ABAL, 2019b)

Figura 13 – Esquema ilustrativo da conformação mecânica aplicada as laminas.



Fonte: ABAL (2019).

Para a aplicação de estampagem, especificamente, fabricação de latas, é necessário ter ganhos em resistência mecânica. Portanto, é necessária uma redução brusca em cerca de 85% da espessura inicial do material. Porém, a laminação a frio tem outras funcionalidades também, como balancear a anisotropia do material, aumentando o estiramento a 45° da direção de laminação. Porém, no recozimento do material, aumenta-se a textura cúbica através de um estiramento maior na direção de 90° da direção da laminação. (CALÇADA, 2018)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados nesse trabalho foram disponibilizados pelo Centro de Tecnologia da Novelis do Brasil, unidade de Pindamonhangaba – SP. Lá também, foram realizados todo o procedimento, sendo utilizado os laboratórios mecânicos e metalográfico. Todos os recursos foram disponibilizados pela Novelis. Tanto de materiais para realização dos procedimentos, quanto humano, disponibilizando profissionais para acompanhamento técnico da utilização dos equipamentos do laboratório.

#### 3.1 MATERIAIS

O material utilizado nesse trabalho foram lâminas da liga AA 3104, portanto, a fusão dos elementos dessa liga seguiu as especificações da *Aluminium Association*. A principal aplicação desse material é a utilização em processos de estampagem para a fabricação dos corpos de latas de alumínio.

Para o desenvolvimento do trabalho, o material foi fornecido na forma de lâmina. A matéria-prima utilizada é reciclada. O material é refundido pelo processo *Direct Chill* (DC) e é obtido placas de alumínio. Posteriormente, as placas passam por um processo de usinagem com fresas. Em seguida, a placa é levada para um forno com o objetivo de homogeneizar a microestrutura, e também, pré-aquecer o material que será laminado. Passa-se o material por laminadores diversas vezes, chegando a reduções de cerca de 85% da espessura inicial.

O produto final estudado nesse trabalho são chapas lavradas, ilustrada na figura 14, possuem uma das superfícies lisa, e outra com “lágrimas”. As lâminas passam por outro setor de laminação, onde a placa encontra-se em temperatura ambiente. Na Laminação a Frio é conferido ao material a resistência mecânica necessária para aplicação estrutural, através de endurecimento por deformação, encruamento do material. Para a produção da chapa lavrada, a lâmina passa por um laminador que possui cavidades onde são formadas as lágrimas. Para isso, é necessária uma redução mínima de aproximadamente 35%, para que o material ao ser laminado preencha toda a cavidade.

Figura 14 – Material disponibilizado pela Novelis para este trabalho.



Fonte: Produção do próprio autor.

As lâminas têm como destino final o Setor de Acabamento, que possui serras refiladeiras, tesouras mecânicas industriais, entre outros componentes. As chapas utilizadas nesse trabalho chegaram como lâminas com a espessura de 2.7 mm.

### 3.2 TRATAMENTO TÉRMICO

Os parâmetros desse trabalho foram definidos junto aos engenheiros responsáveis pelo desenvolvimento de produtos da Novelis. Tinha-se como objetivo entender a evolução da microestrutura, a variação das propriedades mecânicas e testar dobramentos severos no material. Assim, foi definido que seria realizado o tratamento térmico de recozimento nas amostras pelo período de uma hora em cada temperatura, começando pela temperatura de 140°C, variando 20°C até a temperatura de 280°C, posteriormente variando em 15°C até a temperatura de 385°C, sendo um total de 15 temperaturas de recozimento.

Os tratamentos térmicos foram realizados em um forno estacionário do Centro de Tecnologia, ilustrado na figura 15. Para acompanhamento da temperatura no interior do forno, foi utilizado um termopar fixado em uma placa dentro do forno. Esta placa encontrava-se no mesmo patamar em que foram colocadas as amostras, respeitou-se uma diferença de no máximo 3°C de diferença do que era registrado no termopar e configuração do forno.

Figura 15 – Forno industrial e Termopar

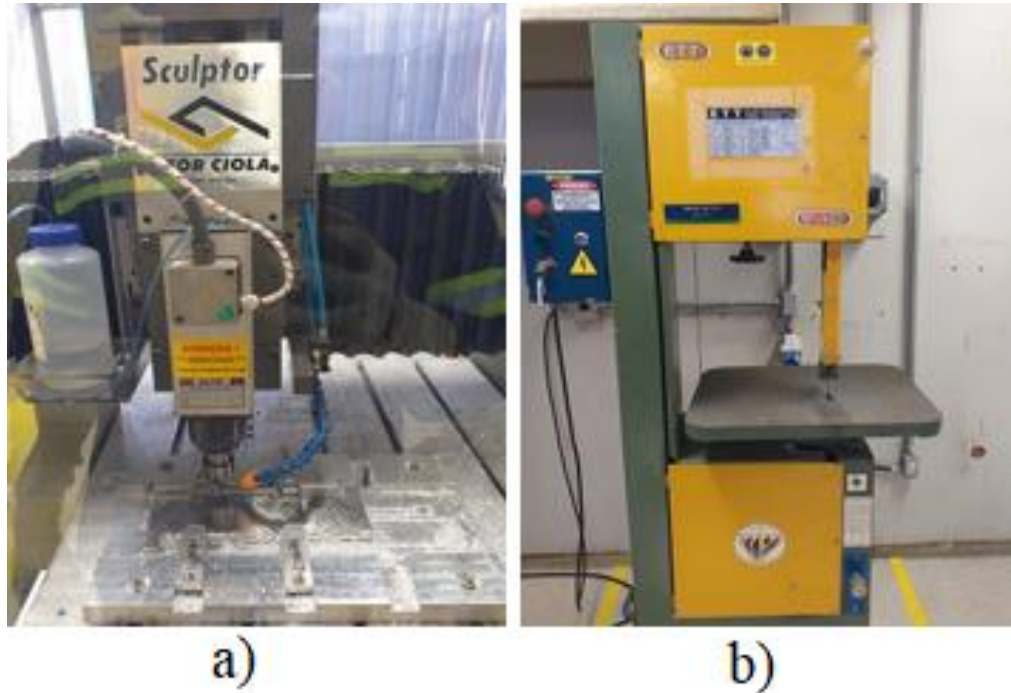


Fonte: Produção do próprio autor.

### 3.3 USINAGEM

As placas disponibilizadas foram cortadas por uma tesoura mecânica. Essas placas possuíam formatos retangulares. Os 32 corpos de prova de tração foram obtidos por uma fresadora CNC Sculptor, marca Victor Ciola, ilustrada na figura 16 a). A usinagem foi realizada de forma automatizada, onde o equipamento possui o desenho do corpo de prova, respeitando a norma ABNT NBR7549 e a fresa acompanha a programação feita. Na serra de fita SF450 marca ETT ilustrada na figura 16 b), foram usinados 32 corpos de prova no formato retangular de 80 x 20 mm para realização dos ensaios de dobramento transversal e longitudinal. Também na serra de fita, foram usinados pequenos retângulos uniformes, de 1mm de lado aproximadamente, para que os mesmo fossem embutidos para realização da micrografia.

Figura 16 - a) Fresadora CNC Sculptor marca Victor Ciola. b) Serra de fita SF-450 marca ETT.

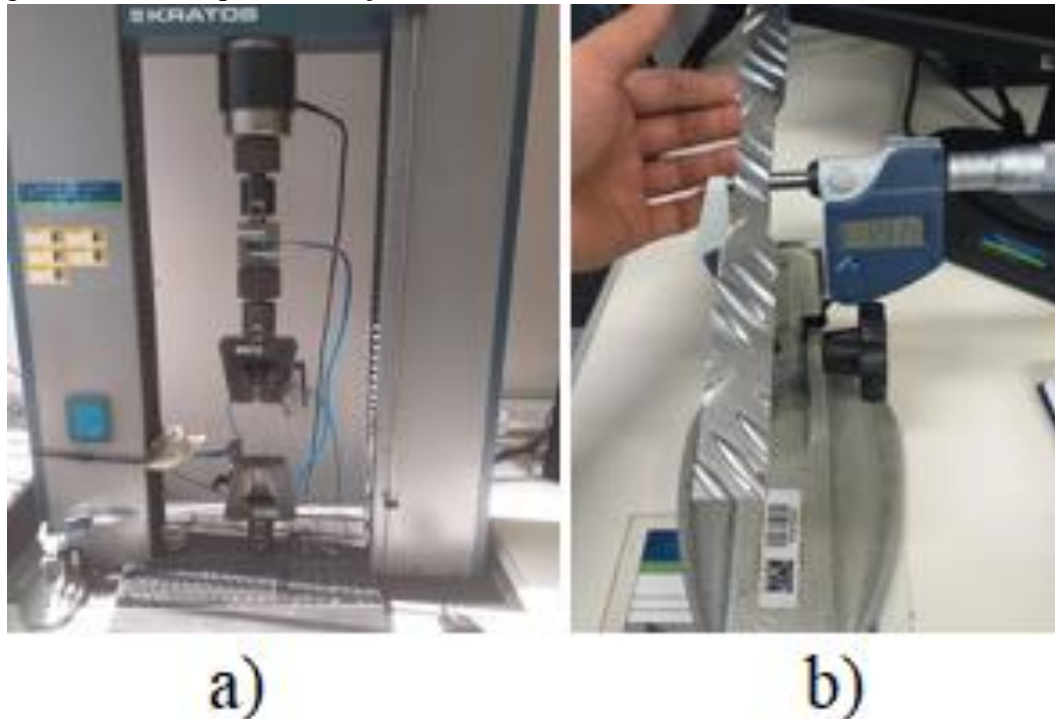


Fonte: Produção do próprio autor.

### 3.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

Após tratamento térmico e usinagem dos corpos de prova, retirou-se duas medidas de espessura de cada corpo de prova, e três medidas de largura, com o auxílio de um micrômetro digital Mitutoyo ilustrado na figura 17 b). O desenho do corpo de prova programada na fresadora, possui uma leve curvatura para dentro, o que reduz a área no meio do corpo de prova, aumentando a probabilidade da fratura naquela região. Portanto, as menores medidas foram informadas no *software* da máquina de tração, para ser calculada as menores áreas úteis da seção transversal do corpo de prova. Tanto o *software*, como a máquina de tração, são da marca Kratos, o modelo da máquina é o KE 10000 MP, ilustrados na figura 17 a). A máquina é equipada com uma célula de carga de aproximadamente 98067 N.

Figura 17 – a) Máquina de tração marca Kratos modelo KE 10000 MP; b) Micrometro



Fonte: Produção do próprio autor.

Os ensaios seguiram a norma ABNT NBR 7549. Os corpos de prova foram tracionados no mesmo eixo do sentido da laminação, com o auxílio de um extensômetro, modelo MTS E30 de 50 mm, utilizado para calcular o alongamento da amostra.

### 3.5 ENSAIO DE DOBRAMENTO

Com os corpos já usinados no formato retangular, realizou-se os ensaios de dobramento em uma máquina montada pela Novelis, a qual possui um dispositivo feito para pressionar o material, através de alavanca, com um cutelo removível e de dimensão igual à espessura do material, conforme especificado na norma ABNT NBR ISO 7438. O material foi apoiado em uma base triangular para promover um dobramento severo em um ângulo de 90°.

Figura 18 – Equipamento de ensaio de dobramento.



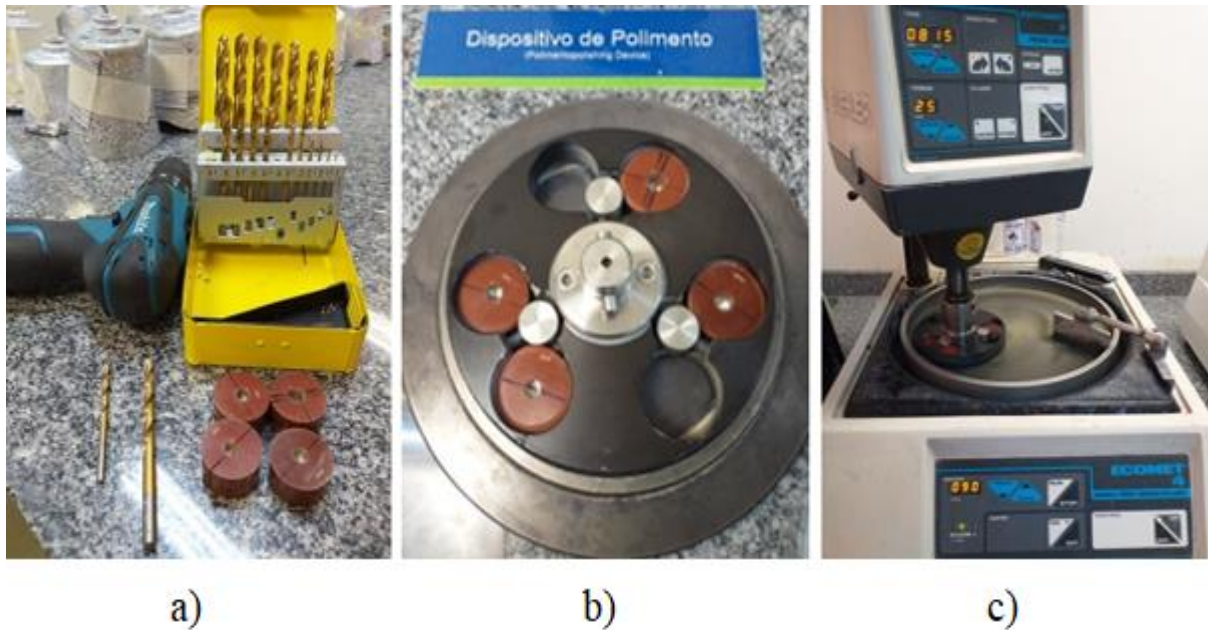
Fonte: Produção do próprio autor.

### 3.6 METALOGRAFIA E MICROSCOPIA ÓPTICA

Todo o procedimento descrito a seguir foi realizado no Laboratório de Metalografia do Centro de Tecnologia da Novelis. Resumidamente, o material foi embutido, lixado, polido e atacado para que fosse possível gerar imagens do tamanho de grão.

Com os materiais previamente cortados, foram embutidas em baquelite nove amostras quadradas de 1 mm de lado. Posteriormente, para realizar o ataque eletrolítico, foi necessário fazer um furo nas baquelites na parte de trás para se obter contato superficial em ambos os lados da amostra. Utilizou-se uma furadeira e brocas de 4" e 6 1/2", ilustradas na figura 19 a). O lixamento foi realizado em um conjunto de equipamentos da marca *Buehler*, como ilustrado na figura 19 b) e c). Foram utilizadas lixas de carbetto de silício com granulometria de 220, 400 e 600 mesh. Nas lixas de 220 e 400 mesh utilizou-se os mesmos parâmetros, rotação da base de 9,42 rad/s, aplicação de força da baquelite contra a base em 53,38N, durante o tempo de 60s; para a lixa de 600, foi utilizado a mesma rotação, porém a força de 62,28N e durante 120s.

Figura 19 – Conjunto de imagens de ferramentas, dispositivos e equipamento para realização de polimento.

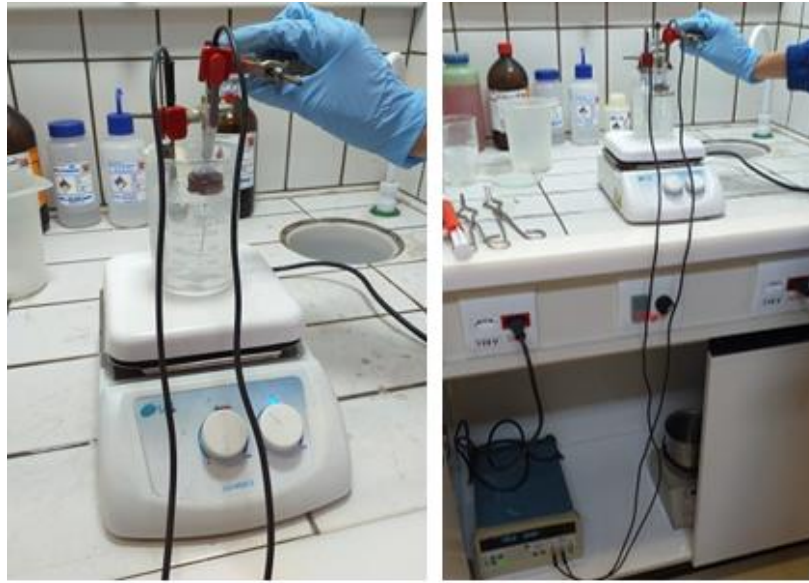


Fonte: Produção do próprio autor.

O polimento foi realizado em um pano *Policloth* da marca *Buehler*, primeiramente, com pasta de diamante de 0,006 mm e com uma solução de álcool isopropílico e água destilada, durante 600s sob uma rotação de 9,42 rad/s, aplicação de 111,1N de força. Em seguida, em um pano *Microcloth* da marca *Buehler* realizou-se polimento com uma solução de 15 mL de Sílica e 35 mL de água destilada, precisamente. Após cada etapa de polimento as amostras foram lavadas com água corrente e uma bucha com detergente neutro, e secas com ar comprimido.

O ataque eletrolítico foi realizado com um equipamento da marca Tektronix, ilustrado em ambas as imagens da figura 20. Preenche-se um becker de 300 mL com uma solução de 10 mL de ácido fluobórico e 290 mL de água destilada. Aplica-se uma tensão por volta de 0,04 A e tensão de 30V, durante 180s.

Figura 20 – Imagens do dispositivo montado para realização de ataque eletrolítico.



a)

b)

Fonte: Produção do próprio autor.

As micrografias foram obtidas de amostras sem tratamento e das temperaturas de recozimento de 280 a 385°C, através de um microscópio ótico Axio Scope.A1 da marca Carl Zeiss. Utilizando-se das lentes de aumento de 50x e 100x e de um *software* analisador de imagem acoplado ao microscópio. Os tamanhos de grãos foram definidos através da norma ASTM E112.

Figura 21 - Microscópio ótico Axio Scope.A1 da marca Carl Zeiss.



Fonte: Produção do próprio autor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados aqui apresentados têm como objetivo agregar conhecimentos para qualificar uma liga para uma aplicação estrutural, porém tenaz suficiente para que o produto final possa ser solicitado por esforços de dobramento. Este procedimento pode promover possíveis melhorias de processo, custo e maior utilização de matéria-prima oriunda de reciclagem. Serão discutidos os fenômenos mecânicos atuantes no material, baseado na literatura clássica sobre encruamento, recuperação e recristalização, para a obtenção da melhor temperatura de recozimento que irá proporcionar ao produto final as propriedades mecânicas requeridas em determinados projetos.

### 4.1 RESULTADOS DO ENSAIO DE DOBRAMENTO

No ensaio de dobramento obteve-se resultados qualitativos sobre a ductilidade do material. A partir da inspeção visual, foi possível identificar as falhas mecânicas. Nas tabelas 2.1 e 2.2, apresentam as classificações dos resultados obtidos: o material fraturou, recebeu a classificação TRIN (trinca); o material fratura, porém o tamanho da trinca é admissível ou a mesma ocorre na base da lágrima, classificado como RANH (ranhura); e, classificado da forma ND (nada ocorreu).

Tabela 2.1. – Resultados dos ensaios de dobramento transversal e longitudinal (Parte 1)

DOBRAMENTO LONGITUDINAL E TRANSVERSAL (0° E 90° DO SENTIDO DA LÂMINA)								
T (°C)	S/T	140	160	180	200	220	240	260
TRANS.	TRIN	TRIN	TRIN	TRIN	RANH	TRIN	TRIN	RANH
LONG.	TRIN	TRIN	TRIN	TRIN	TRIN	RANH	TRIN	ND

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 2.2. – Resultados dos ensaios de dobramento transversal e longitudinal (Parte 2)

DOBRAMENTO LONGITUDINAL E TRANSVERSAL (0° E 90° DO SENTIDO DA LÂMINA)								
T (°C)	280	295	310	325	340	355	370	385
TRANS.	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
LONG.	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Fonte: Produção do próprio autor.

Como podemos observar na figura 22, não há fraturas.

N/D

Figura 22 – Corpos de prova recozidos a temperaturas acima de 280°C após dobramento.



Fonte: Produção do próprio autor.

Na figura 23, pode ser observado pequenas falhas na região da base das lágrimas e próxima as laterais, onde ocorreu uma usinagem mais grosseira.

RANHURA

Figura 23 – Corpos de prova recozidos nas temperaturas de 200°C (superior) e 220°C (inferior) após dobramento.



Fonte: Produção de próprio autor.

A figura 24 ilustra o problema apresentado pelo cliente, material fratura quando se tem solicitações de dobramentos severos. Sendo a justificativa deste trabalho, desenvolver um material mais dúctil.

### TRINCA

Figura 24 – Corpos de prova recozidos a temperaturas abaixo acima de 200°C após dobramento.

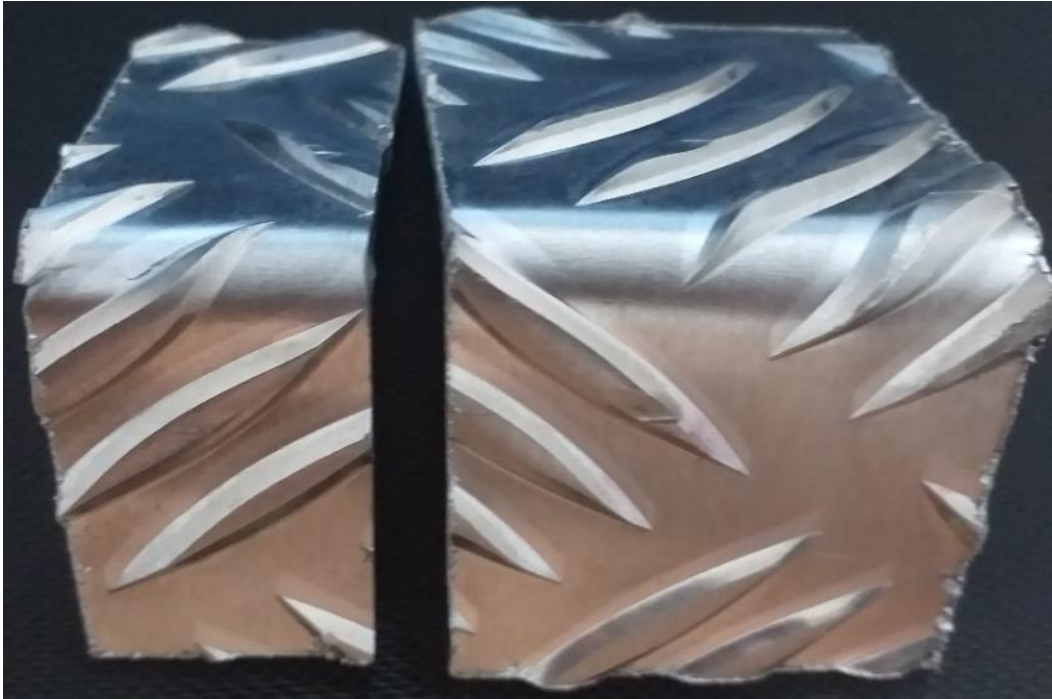


Fonte: Produção do próprio autor.

Nesta etapa de análise, foi levantado um questionamento com relação a influências externas para o aparecimento de fratura, como o fato do corpo de prova ter sido usinado com um equipamento considerado grosseiro, a serra de fita; e o formato da lágrima, que possui uma geometria que proporciona uma maior concentração de defeitos em sua base, onde tem uma inclinação acentuada. Assim, cortou-se um corpo de prova com uma largura maior suficientemente para que, um conjunto de lagrimas ficasse centralizado, a partir da chapa recozida a 260°C, com base nos resultados apresentados nas tabelas 2.1 e 2.2.

Como podemos ver na figura 25, ambos os corpos de prova apresentam trinca nas laterais onde foi realizada a usinagem. O corpo de prova da direita, com maior largura, não apresentou trincas em seu centro, mesmo na base da lágrima, o que indica que a usinagem influencia nas trincas. Com relação à geometria da lágrima, é possível afirmar que preferencialmente a trinca ocorre na base, onde a lágrima praticamente descola da chapa. Porém, o objetivo do trabalho não é discutir sobre a geometria do produto, mas analisar a curva de recozimento e os aspectos metalúrgicos da liga.

Figura 25 – Corpos de prova recozidos a temperatura de 260°C após dobramento

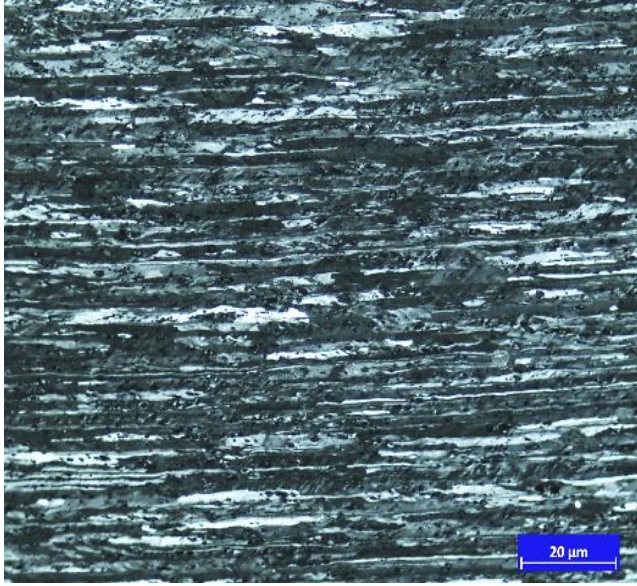
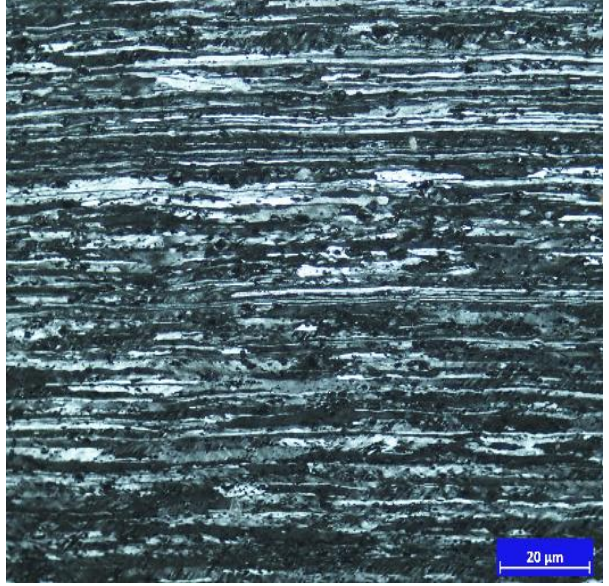


Fonte: Produção do próprio autor.

## 4.2 ANÁLISE METALOGRÁFICA

A micrografia foi realizada em uma amostra encruada e em amostras que passaram pelo tratamento térmico a partir da temperatura de 280°C a 385°C, com base nos resultados apresentados no ensaio de dobramento. Como se pode observar no quadro 2, o estado recuperado não apresenta diferenças significativas no tamanho e formato de grãos.

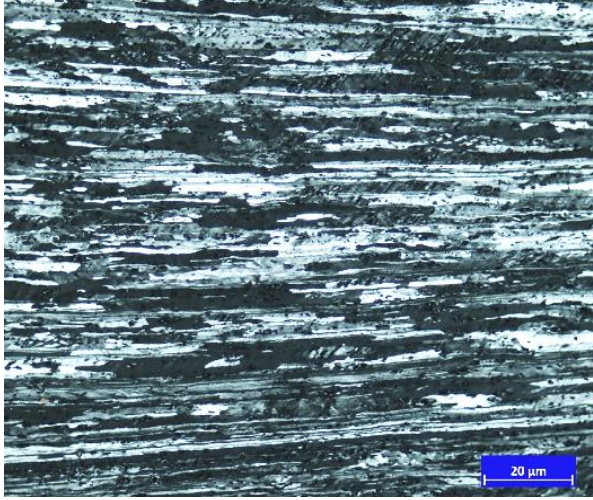
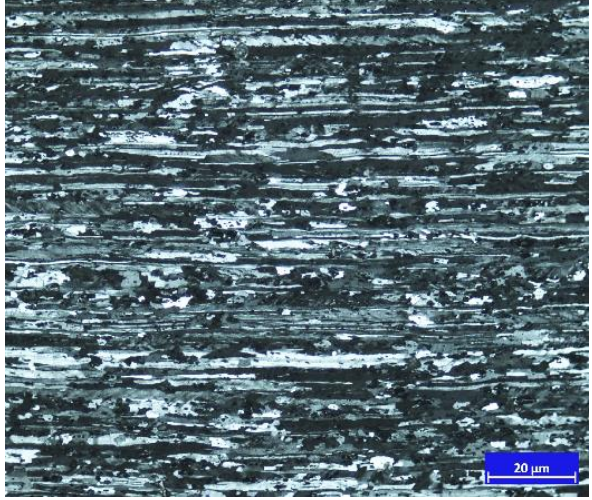
Quadro 2 – Micrografias das amostras sem tratamento térmico e recozidas na temperatura de 280°C durante 1 h.

S/T	280°C
	
<p>Material encruado, grãos muito deformados e unidirecionais, pois a redução dimensional em área é muito intensa.</p>	<p>Pouca variação em relação ao material encruado, o material encontra-se no estado recuperado, porém não é percebido mudança significativa nos grãos.</p>

Fonte: Produção do próprio autor

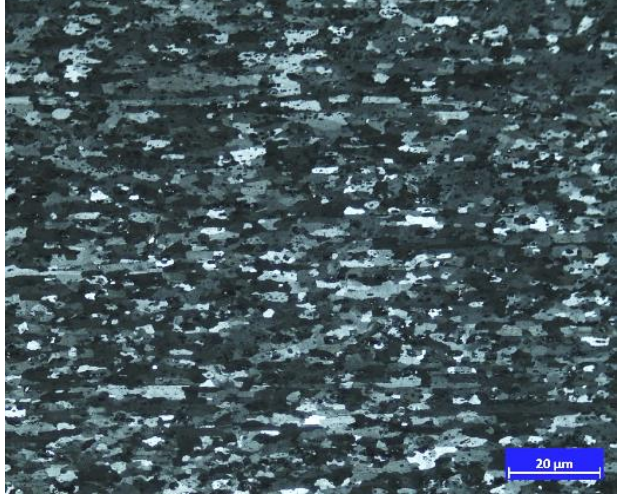
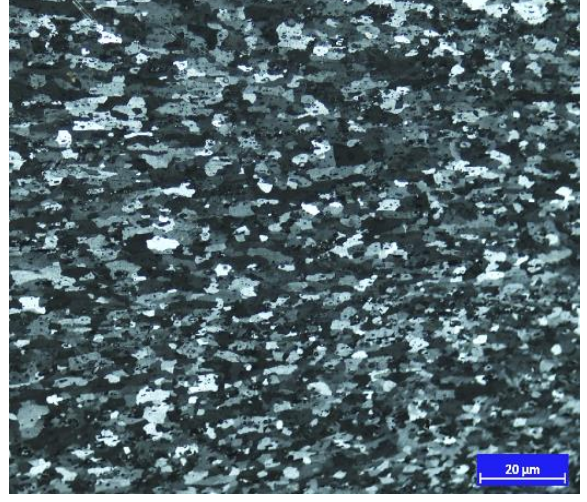
No início da recristalização, a microestrutura apresenta, em maioria, grãos alongados, porém alguns núcleos arredondados começam a se formar, que caracteriza uma recristalização parcial. Como podemos ver nos quadros 3 e 4, entre 310° e 325°, tem-se presente o mecanismo de recristalização parcial, e a partir de 340°C a recristalização é plena.

Quadro 3 – Micrografias das amostras recozidas nas temperaturas de 295 e 310°C durante 1h.

295°C	310°C
	
<p>Ainda muito próximo à imagem do material encruado, em algumas regiões, os grãos estão menos alongados e mais largos.</p>	<p>Há o aparecimento de pequenos núcleos, região com baixa quantidade de defeitos. São pequenas estruturas arredondadas que, caracterizam o início da recristalização.</p>

Fonte: Produção do próprio autor.

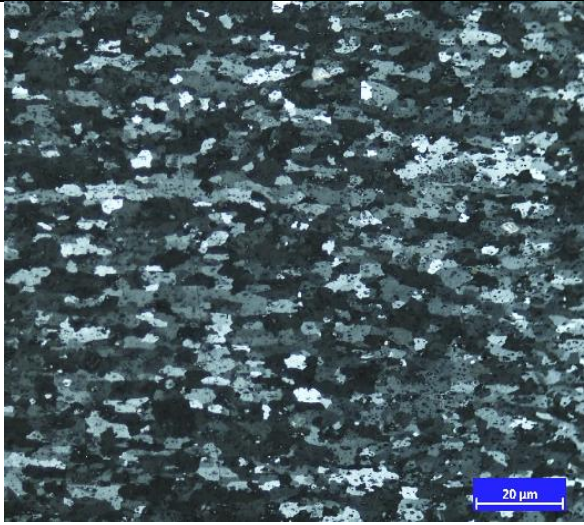
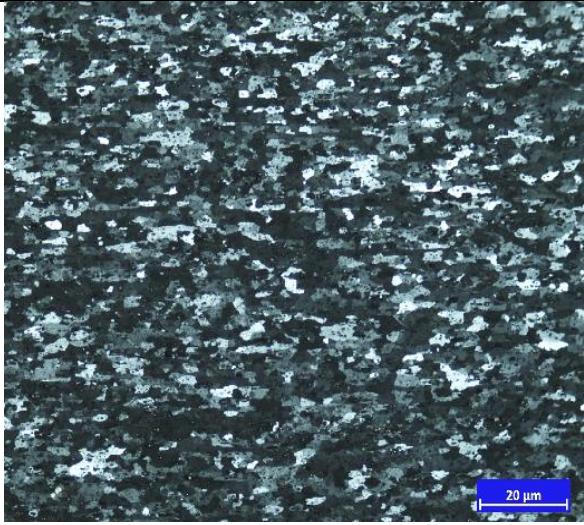
Quadro 4 – Micrografias das amostras recozidas nas temperaturas de 325 e 340°C durante 1 h.

325°C	340°C
	
<p>Algumas regiões da imagem ainda possuem grãos alongados, mas é nítida a recristalização parcial. A maioria dos grãos possui formato mais equiaxial.</p>	<p>Não há mais grãos alongados. Pequenos grãos arredondados ainda se formam. O tamanho de grão é heterogêneo, porém a recristalização é plena.</p>

Fonte: Produção do próprio autor.

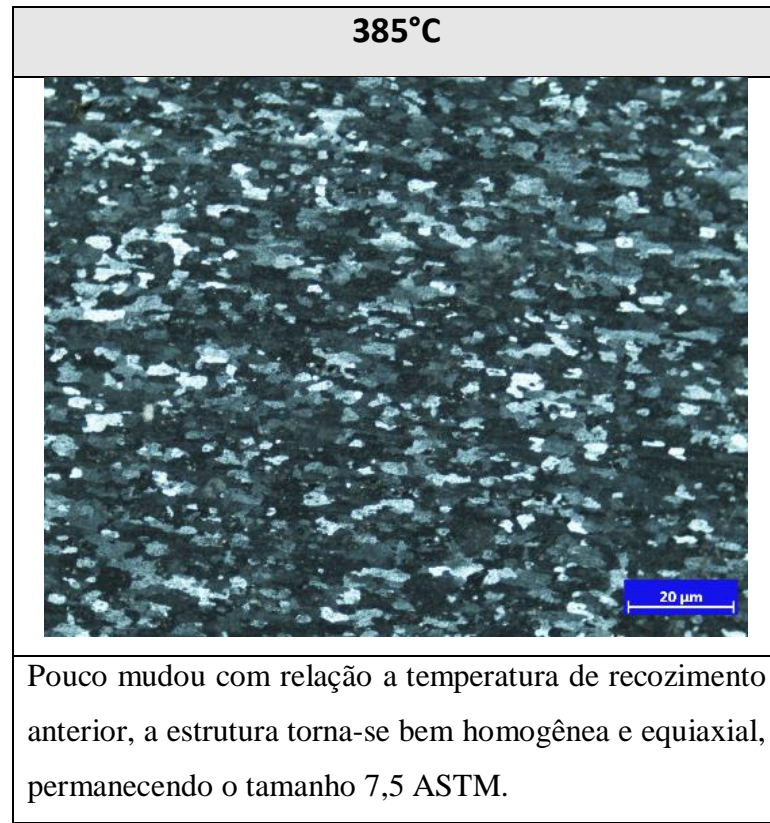
A recristalização ocorre preferencialmente da superfície para o interior do material, isso acontece pois a energia de deformação armazenada é maior próximo à superfície. Assim como o calor fornecido pelo forno, a energia absorvida fica mais retida na superfície. Portanto, mesmo que a recristalização seja plena, ou seja, não há mais grãos alongados na microestrutura, o tamanho dos grãos tende a ficar mais homogêneo, quanto maior for a temperatura de recozimento. Observa-se no quadro 5 e 6, a variação do tamanho de grão, mas não é possível verificar crescimento de grão nas temperaturas analisadas.

Quadro 5 – Micrografias das amostras recozidas na temperatura de 355°C e 370°C durante 1h.

355°C	370°C
	
<p>O tamanho de grão é mais homogêneo, analisando visualmente pode-se dizer que o tamanho de grão segundo a ASTM é 7,0</p>	<p>Os grãos apresentam-se mais equiaxiais, aumentou-se o número de grãos, houve crescimento dos subgrãos que foram se formando, o tamanho de grão segundo a ASTM é 7,5</p>

Fonte: Produção do próprio autor.

Quadro 6 – Micrografias das amostras recozidas na temperatura de 385°C durante 1 h.



Fonte: Produção do próprio autor.

#### 4.3 RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO

Para a realização dos ensaios de tração, foram tiradas duas medidas de espessura e três de largura do material, como comentado na metodologia, essas medidas estão apresentadas no Apêndice A. A realização dos ensaios de tração mensurou três principais propriedades: tensão de escoamento ( $\sigma_e$ ); tensão máxima de resistência a tração ( $\sigma_t$ ); e, alongamento (L) do material. A tabela 3, apresenta as propriedades citadas e a menor área da seção transversal utilizada nas vases de cálculos.

Tabela 3 - Resultados das propriedades mecânicas obtidos através de ensaio de tração.

Amostra	T Recoz.	Área (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_e$ (MPa)	Media $\sigma_e$	$\sigma_t$ (MPa)	Media $\sigma_e$	Along(%)	Media L
1	S/T	33,71	232,42	232,91	245,26	246,05	2,62	2,92
2		34,02	233,30		246,83		3,22	
3	140	33,52	218,69	220,85	250,66	249,87	4,48	4,00
4		33,66	222,91		248,99		3,52	
5	160	33,44	215,26	208,20	252,33	250,66	4,40	3,92
6		33,72	201,04		248,89		3,44	
7	180	33,74	213,88	212,41	253,01	252,91	5,64	5,61
8		33,77	210,84		252,82		5,58	
9	200	33,67	207,51	208,59	252,23	250,27	5,86	5,91
10		33,60	209,67		248,21		5,96	
11	220	33,49	191,33	192,11	238,50	236,05	5,56	5,03
12		33,52	192,80		233,50		4,50	
13	240	33,23	188,09	185,93	230,85	228,79	6,12	5,34
14		33,59	183,68		226,73		4,56	
15	260	33,96	173,38	176,62	221,63	222,51	5,50	5,99
16		33,31	179,85		223,40		6,48	
17	280	32,96	170,34	169,66	223,40	217,71	7,60	6,89
18		33,51	168,97		221,92		6,18	
19	295	33,57	150,24	149,26	208,69	210,45	7,12	8,01
20		33,23	148,28		212,22		8,90	
21	310	33,55	121,99	123,07	200,94	200,55	8,62	8,40
22		33,41	124,15		200,15		8,18	
23	325	33,32	95,32	99,54	187,21	185,74	14,06	13,86
24		33,77	103,75		184,27		13,70	
25	340	33,67	83,85	82,77	184,27	184,07	12,00	12,15
26		33,48	81,69		183,78		12,30	
27	355	33,56	86,20	82,96	187,01	187,70	15,02	14,71
28		33,58	79,63		188,29		14,40	
29	370	33,59	76,79	82,28	184,86	185,44	14,80	14,95
30		33,60	87,67		185,93		15,10	
31	385	33,65	74,63	75,61	184,76	184,56	14,54	14,42
32		33,23	76,59		184,27		14,30	

Fonte: Produção do próprio autor.

A norma ABNT NBR 15963 determina intervalos de propriedades mecânicas das ligas, com base na composição química e estrutura molecular correspondente. Assim, foi possível comparar os resultados das propriedades mecânicas obtidos do material sem tratamento térmico com os valores determinados pela norma. O material utilizado neste trabalho foi processado de maneira a atender as especificações mínimas da *Aluminum Association*, conforme apresentado na tabela 4.

Tabela 4 - Requisitos para as propriedades mecânicas para a liga AA 3104.

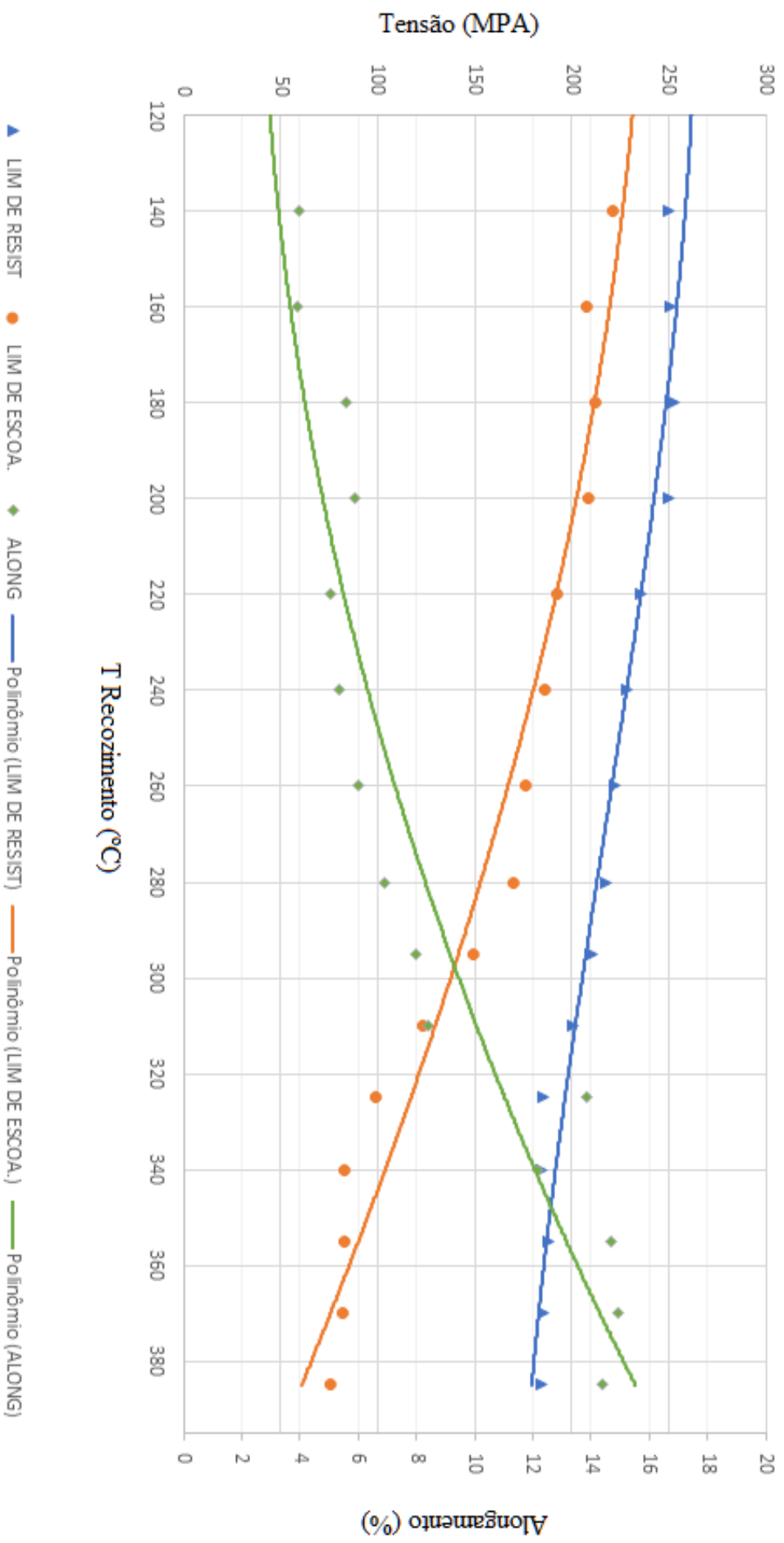
Norma	Liga	Tempera	Espessura (mm)	LR mín (MPA)	LR máx (MPA)	LE mín (MPA)	Along. Mín (%)
ABNT15963	3104	H314	2,666	190	280	145	3

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15963 (2011).

O gráfico da curva de recozimento é traçado com o objetivo de caracterizar e registrar a evolução das propriedades mecânicas em função da temperatura de recozimento. Portanto, é uma das ferramentas de análise para descrever uma rota de processamento em função da aplicação desejada, reduzindo temperaturas de fornos a um ponto que seja suficiente para determinada utilização.

Como se observa no gráfico a seguir, a resistência mecânica é reduzida com o aumento da temperatura de recozimento. Assim como a liga apresenta um ganho em ductilidade, aumento do alongamento permitido pelo material antes de fraturar. Ao fazer uma análise na evolução das propriedades, no desenho da curva, é possível analisar uma evolução em 3 diferentes estágios.

Gráfico - Curva de Recozimento da liga de alumínio AA3104 H19



Fonte: Produção do próprio autor

O primeiro estágio, de 140 a 280°C, pouco altera as propriedades. Fazendo uma análise com os resultados de dobramento, é nessa faixa de temperatura, em que ocorrem as fraturas nas amostras. A micrografia da amostra na temperatura de 280°C apresenta apenas grãos alongados, muito próxima do material encruado. Portanto, corresponde a faixa de recuperação do material.

O segundo, de 280 a 325°C, apresenta grandes alterações nas propriedades, maior inclinação da curva, uma faixa de temperatura de transição entre o material encruado/recuperado e recristalizado. O material não sofre mais fratura, tem-se o início da recristalização do material. A micrografia apresenta núcleos, alguns grãos arredondados, caracterizando a recuperação parcial.

O último, de 340 a 385°C, apresenta uma estabilização das propriedades, quer dizer que o material encontra-se recristalizado. A micrografia não apresenta mais grãos alongados, a microestrutura começa a ficar mais homogênea, grãos com mesmo tamanho e formato, caracterizando o recozimento pleno do material.

## 5 CONCLUSÃO

Nos ensaios de dobramento, obteve-se resultados qualitativos, que indica que a liga de alumínio AA3104, a partir de 280°C, apresentou ductilidade suficiente para realizar dobramentos severos sem fraturar ou fragilizar. O material está recuperado a essa temperatura, 280°C, porém começa a recristalizar a partir da temperatura de 310°C, verifica-se maior variação das propriedades mecânicas, os primeiros mecanismos são mais nítidos, como comentado na análise da micrografia. A partir de 340°C, a recristalização torna-se plena, há uma estabilização das propriedades mecânicas, os grãos apresentam-se mais equiaxiais e homogêneos, com tamanho de grão por volta de 7,0 ASTM, e em temperaturas maiores, 370°C, o tamanho do grão é reduzido a 7,5 ASTM.

Com os resultados obtidos no ensaio de tração, foi possível traçar uma curva que mostra a evolução das propriedades mecânicas com o aumento da temperatura de recozimento. Pode-se observar que o ganho obtido em resistência mecânica após o encruamento do material, perdeu a sua intensidade devido ao tratamento térmico. Por outro lado, o ganho necessário em alongamento foi obtido.

De modo geral, o objetivo do trabalho foi concluído. Identificou-se as temperaturas de recozimento em que se inicia cada mecanismo para a espessura determinada. Também apresentou resultados práticos com relação a ductilidade do material. Por fim, o trabalho carrega informações para próximos estudos e viabilizações de projetos.

## REFERENCIAS

- ABAL - São Paulo. **História do alumínio**. Disponível em: <http://abal.org.br/aluminio/historia-da-industria-do-aluminio/historia-da-industria-no-brasil/>. Acesso em: 17 jun. 2019a.
- ABAL - São Paulo. **Processos de produção**. Disponível em: <http://abal.org.br/aluminio/processos-de-producao/>. Acesso em: 17 jun. 2019b.
- ABRALATAS - Brasília. **10 anos de liderança**. 2011. Disponível em: <http://www.abralatas.org.br/10-anos-na-lideranca-2/>. Acesso em: 10 set. 2019.
- ABRALATAS – Brasília, BRASIL. **Índices de reciclagem de embalagens – 1997 a 2017**. 2018. Disponível em: <http://www.abralatas.org.br/grafico/mundo-indices-de-reciclagem-da-lata-de-aluminio-para-bebidas-1991-a-2012/>. Acesso em: 10 set. 2019.
- ALUMINUM ASSOCIATION. **International alloy designations and chemical composition limits for wrought aluminum and wrought aluminum alloys**. Registration Record Series. Washington, DC. 2009.
- CALÇADA, M. V. **Avaliação mecânica e microestrutural da liga de alumínio AA3104 empregada na indústria de fabricação de latas laminada à frio com e sem interpasses**. 2018. 85 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.
- CALISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Editora LTC. 7. ed. 2008.
- CATARINA, D.; ROCHA, A. M. **Influência da taxa de deformação e temperatura de recozimento nas propriedades mecânicas da liga AA3104**. 2013. 59 f. Tese (Curso Superior de Tecnologia em Processos Metalúrgicos) - Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba, São Paulo, 2013.
- SOUZA, S. H. de. **Cinética de amolecimento da liga de alumínio AA 7075 durante recozimento após laminação a frio**. 2018. 76 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.
- GUIA TÉCNICO DO ALUMÍNIO. **Fundamentos do alumínio e suas aplicações**. São Paulo: ABAL. 2004.
- MINATEL, R. **Estudo comparativo sobre a recristalização de chapas de alumínio AA1200 e AA3003 obtidas por lingotamento contínuo (twinrollcaster) e por fundição de placas (directchill)**. 2009. 66 f. Tese (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. *E-book*. Disponível em: [https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-05062009100623/publico/Dissertacao\\_final\\_Revisada.pdf](https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-05062009100623/publico/Dissertacao_final_Revisada.pdf). Acesso em: 24 nov. 2019.
- PADILHA, A. F., SICILIANO, Jr. F. **Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura**. 3. ed. ABM. São Paulo. 2005.

**PINTO, C G. Estudo sobre o efeito do tratamento térmico de recuperação nas propriedades mecânicas da liga AA 5182 utilizada na fabricação de tampas de latas de bebidas.** 2019. 82 f. Tese (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, Lorena, 2019. *E-book*. Disponível em: [https://teses.usp.br/teses/disponiveis/97/97134/tde-28052019-150911/publico/EMD18010\\_C.pdf](https://teses.usp.br/teses/disponiveis/97/97134/tde-28052019-150911/publico/EMD18010_C.pdf) . Acesso em: 24 nov. 2019.

**ZANGRANDI, A. Um estudo sobre o endurecimento, o processamento e propriedade mecânicas de uma liga de alumínio da série 3XXX tipo AA3194 com adição de zinco.** 2006. 140 f. Tese (Livre-Docente em Propriedades Mecânicas dos Materiais) - Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006. *E-book*. Disponível em: [https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/116076/zangrandi\\_a\\_ld\\_guara.pdf?sequence=1](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/116076/zangrandi_a_ld_guara.pdf?sequence=1). Acesso em: 24 nov. 2019.

## APÊNDICE A

Amostra	T Recozimento	e 1 (mm)	e 2 (mm)	L 1 (mm)	L 2 (mm)	L 3 (mm)
1	S/T	2,662	2,668	12,662	12,726	12,737
2		2,700	2,701	12,601	12,667	12,747
3	140	2,661	2,756	12,595	12,670	12,680
4		2,658	2,681	12,662	12,734	12,743
5	160	2,640	2,682	12,666	12,673	12,757
6		2,666	2,743	12,649	12,664	12,738
7	180	2,665	2,670	12,661	12,687	12,742
8		2,661	2,765	12,691	12,671	12,753
9	200	2,662	2,675	12,649	12,677	12,763
10		2,656	2,663	12,651	12,693	12,733
11	220	2,644	2,644	12,667	12,684	12,734
12		2,648	2,660	12,658	12,683	12,755
13	240	2,628	2,633	12,645	12,661	12,746
14		2,658	2,672	12,637	12,644	12,715
15	260	2,683	2,711	12,658	12,686	12,737
16		2,634	2,662	12,647	12,655	12,733
17	280	2,616	2,634	12,601	12,637	12,693
18		2,637	2,684	12,708	12,725	12,743
19	295	2,657	2,678	12,636	12,681	12,695
20		2,643	2,659	12,571	12,575	12,682
21	310	2,659	2,727	12,618	12,628	12,701
22		2,638	2,641	12,664	12,715	12,727
23	325	2,647	2,660	12,589	12,603	12,687
24		2,671	2,678	12,645	12,656	12,737
25	340	2,668	2,679	12,620	12,663	12,707
26		2,639	2,641	12,688	12,701	12,728
27	355	2,657	2,675	12,631	12,653	12,735
28		2,653	2,669	12,656	12,663	12,738
29	370	2,658	2,658	12,637	12,647	12,817
30		2,664	2,702	12,612	12,695	12,699
31	385	2,667	2,676	12,616	12,678	12,769
32		2,635	2,643	12,610	12,632	12,694